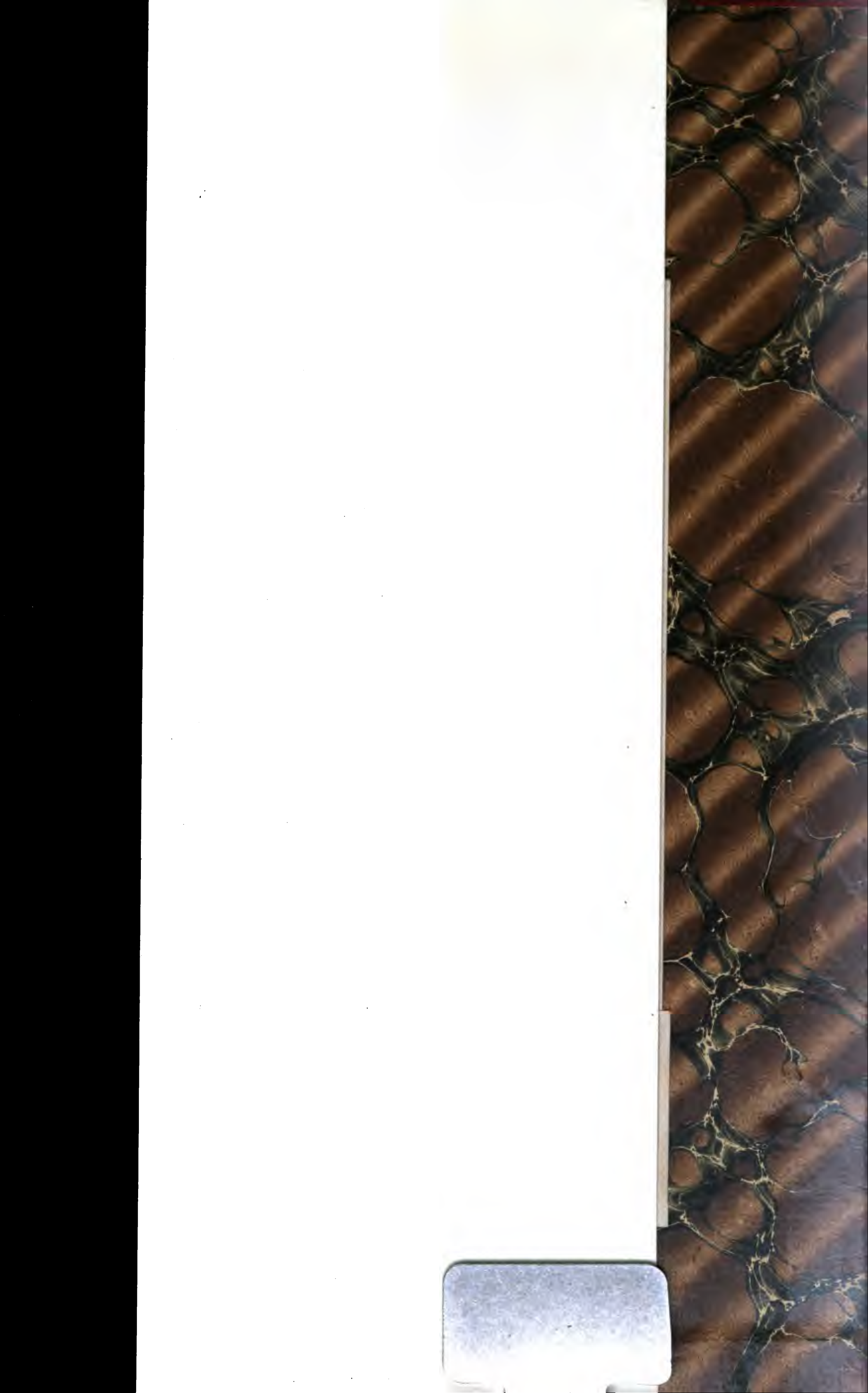
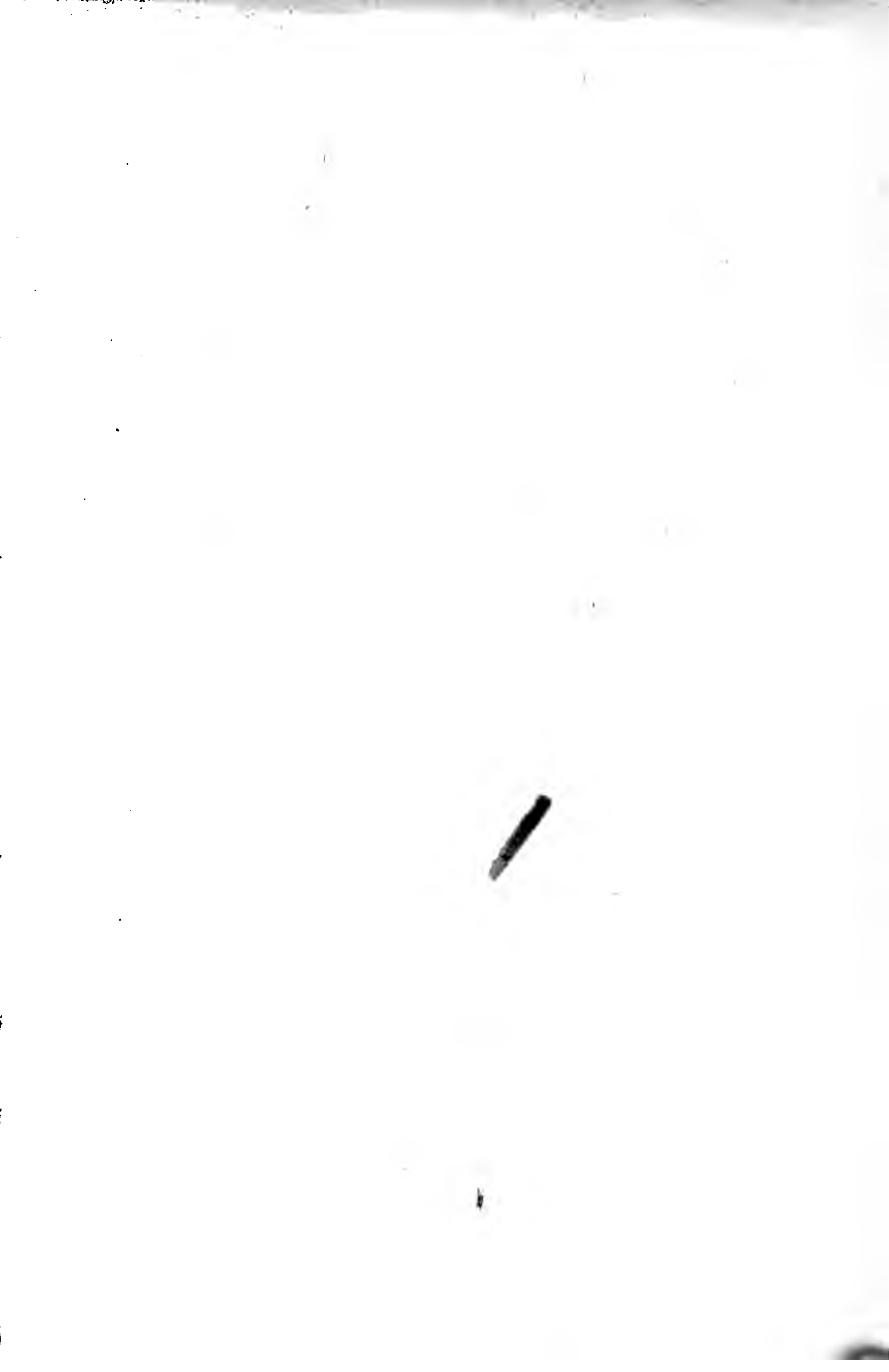



ALPHONSE
PICARD & FILS
EDITEURS
RUE BONAPARTE
-82-
PARIS VIe ARROND.
LIBRAIRIE
ANCIENNE
D'OCCASION
COMMISSION
LIVRES NEUFS
FRANÇAIS
&
ETRANGERS



GUIDE PRATIQUE

DE

MESURES ET ESSAIS

INDUSTRIELS

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE

APPLICATIONS

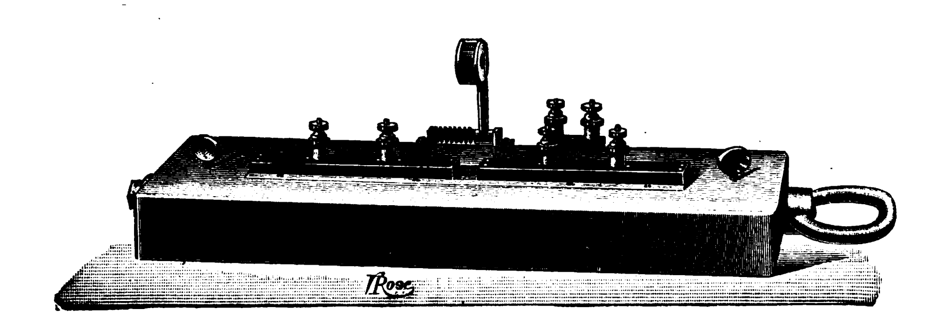
PAR

J.-A. MONTPELLIER
Rédacteur en chef de « l'Électricien ».

M. ALIAMET
Inspecteur des services électriques de la Cie du Nord.

TOME II

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE
DES QUANTITÉS MAGNÉTIQUES



PARIS
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR
LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
DES TÉLÉGRAPHES ET DES CHEMINS DE FER
49, quai des Grands-Augustins, 49

1904

Plus de 300.000 appareils en service en Europe.

GUIDE PRATIQUE

DE

MESURES ET ESSAIS

INDUSTRIELS

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE

APPLICATIONS

GUIDE PRATIQUE
DE
MESURES ET ESSAIS
INDUSTRIELS

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE
APPLICATIONS

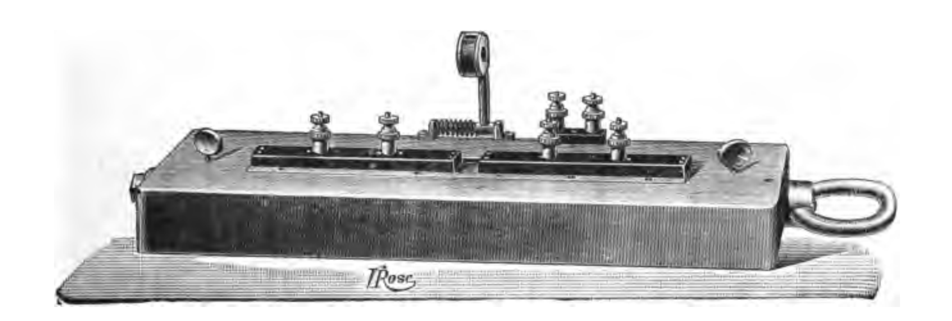
PAR

J.-A. MONTPELLIER
Rédacteur en chef de « l'Électricien ».

M. ALIAMET
Inspecteur des services électriques de la Cie du Nord.

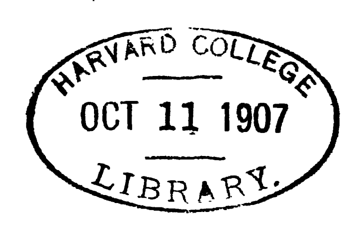
TOME II

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE
DES QUANTITÉS MAGNÉTIQUES



PARIS
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR
LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
DES TÉLÉGRAPHES ET DES CHEMINS DE FER
49, quai des Grands-Augustins, 49

1904


HARVARD COLLEGE
OCT 11 1907
LIBRARY.

GUIDE PRATIQUE

DE

MESURES ET ESSAIS

INDUSTRIELS

SIXIÈME PARTIE

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE

DES QUANTITÉS MAGNÉTIQUES

I

LES QUANTITÉS ET LES UNITÉS MAGNÉTIQUES

Lois des actions magnétiques. — Intensité de pôle. — Moment magnétique. — Intensité d'aimantation. — Intensité de champ. — Flux de force magnétique. — Induction magnétique. — Perméabilité. — Susceptibilité. — Réluctivité. — Circuit magnétique. — Réluctance. — Force magnétomotrice. — Force magnétisante.

Lois des actions magnétiques. — Le système *C. G. S.* de quantités et d'unités magnétiques est fondé sur les principes énoncés dans les lois de Coulomb :

Deux pôles de même nom se repoussent; deux pôles de nom contraire s'attirent.

La force F exercée entre deux pôles magnétiques m et m' est proportionnelle au produit de leurs intensités, inversement proportionnelle au carré de la distance L qui les sépare et propor-

tionnelle à une constante k, fonction du milieu dans lequel ils sont placés :

$$F = k\frac{mm'}{L^2}.$$

Dans le système magnétique *C. G. S.*, on donne à k la valeur 1 pour l'air.

Intensité de pôle. — L'*intensité de pôle* a pour symbole m. D'après les lois de Coulomb, deux pôles dont les intensités sont m et m', placés à une distance L, exercent entre eux une force attractive, s'ils sont de nom contraire, ou répulsive, s'ils sont de même nom. La grandeur de cette force est donnée par la relation :

$$F = \frac{mm'}{L^2},$$

expression qui est l'équation de définition de l'intensité de pôle.

Si m est égal à m', on a :

$$FL^2 = m^2$$

ou

$$m = L\sqrt{F}$$

Les dimensions de l'intensité de pôle sont donc :

$$\mathrm{L}\sqrt{\mathrm{LMT}^{-2}} = \mathrm{L}^{\frac{3}{2}}\mathrm{M}^{\frac{1}{2}}\mathrm{T}^{-1}.$$

L'unité *C. G. S.* d'intensité de pôle a pour valeur l'intensité du pôle qui repousse un pôle de même nom, placé à une distance de 1 centimètre, avec une force égale à 1 dyne. Cette unité n'a pas reçu de nom spécial. Dans un aimant, les deux pôles ont même intensité.

Moment magnétique. — Le moment magnétique a pour symbole $\mathcal{M}$. Le *moment magnétique* d'un aimant est le produit de l'intensité m d'un des pôles de cet aimant par la distance l qui les sépare ; l'équation de définition est, par conséquent :

$$\mathcal{M} = ml.$$

Les dimensions du moment magnétique sont :

$$L^{\frac{5}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}.$$

L'unité *C. G. S.* de moment magnétique est le moment d'un aimant dont les pôles sont distants de 1 centimètre et ont une

intensité égale à 1 unité *C. G. S.* Cette unité n'a pas reçu de nom spécial.

Intensité d'aimantation — Le symbole de cette quantité est $\mathfrak{J}$. L'*intensité d'aimantation* est le quotient du moment magnétique $\mathfrak{M}$ d'un aimant par son volume V ; son équation de définition est, par conséquent :

$$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{M}}{V}.$$

Les dimensions de l'intensité d'aimantation sont :

$$L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

L'unité *C. G. S.* d'intensité d'aimantation est celle d'un aimant ayant un volume de 1 centimètre cube et dont le moment magnétique a pour valeur 1 unité *C. G. S.*

Intensité de champ. — L'*intensité de champ magnétique*, dont le symbole est $\mathcal{H}$, est une quantité dont la valeur, en un point donné, est le quotient de la force F exercée sur un pôle m, placé dans le champ au point considéré, par l'intensité de ce pôle, ce qui donne pour équation de définition :

$$\mathcal{H} = \frac{F}{m}.$$

Un champ magnétique est dit uniforme lorsque son intensité est la même en tous ses points.

Les dimensions de l'intensité de champ sont :

$$L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

L'unité *C. G. S.* d'intensité de champ est celle d'un champ qui exerce une force de 1 dyne sur un pôle placé dans ce champ et ayant 1 unité *C. G. S.* d'intensité.

Cette unité a reçu le nom de *gauss*.

Flux de force magnétique. — On donne le nom de *flux de force magnétique*, dans une surface donnée S, au produit de cette surface par l'intensité du champ $\mathcal{H}$, supposé uniforme, chacun des éléments de cette surface étant normal à la direction du flux de force qui le traverse. Le flux de force a pour symbole Φ et son équation de définition est :

$$\Phi = \mathcal{H} S.$$

Les dimensions du flux de force sont :

$$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

L'unité *C. G. S.* de flux de force est le flux produit par un champ magnétique, ayant une intensité de 1 unité *C. G. S.*, traversant normalement une surface de 1 centimètre carré. Cette unité a reçu le nom de *maxwell.*

Induction magnétique. — Un barreau de section S, d'une substance magnétique, étant disposé parallèlement à la direction d'un champ magnétique d'intensité $\mathcal{H}$, est traversé par un flux d'induction magnétique total. Ce flux est dû à la superposition d'un flux $\mathcal{H}S$ correspondant au champ lui-même et d'un flux induit dans la substance par le champ qui la traverse. Le flux d'induction total est proportionnel à la section S du barreau et à un facteur $\mathcal{B}$ qui se nomme induction magnétique.

Dans un barreau très long par rapport à sa section, l'induction est égale à la somme du champ $\mathcal{H}$ et de l'intensité d'aimantation $\mathcal{J}$ multipliée par 4π.

$$\mathcal{B} = \mathcal{H} + 4\pi\mathcal{J}$$

Pour les substances magnétiques $\mathcal{B}$ est toujours plus grand que $\mathcal{H}$.

L'unité *C. G. S.* d'induction magnétique est la même que l'unité d'intensité de champ et elle porte également le nom de *gauss.*

Perméabilité. — La *perméabilité*, dont le symbole est μ, est le rapport de l'induction magnétique à l'intensité du champ magnétique qui la produit; par conséquent, son équation de définition est :

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}.$$

Cette quantité n'a pas de dimensions, c'est un simple coefficient numérique.

Dans l'air et dans les milieux non magnétiques, ce coefficient est pris égal à 1 ; dans les milieux magnétiques, μ est plus grand que l'unité et peut atteindre 2600 dans le meilleur fer avec une induction convenable voisine de 5000 gauss. Enfin, dans les milieux diamagnétiques, μ est inférieur à l'unité sans jamais toutefois pouvoir devenir nul.

Susceptibilité. — La *susceptibilité magnétique*, ou coefficient

d'aimantation induite, dont le symbole est K, est le rapport de l'intensité d'aimantation $\mathfrak{J}$ à l'intensité du champ magnétique $\mathcal{H}$ qui produit cette aimantation.

Son équation de définition est, par suite,

$$K = \frac{\mathfrak{J}}{\mathcal{H}}.$$

Cette quantité n'a pas de dimensions car c'est un simple coefficient numérique.

Entre la perméabilité et la susceptibilité magnétiques, il existe la relation suivante :

$$K = \frac{\mu - 1}{4\pi}, \text{ d'où } \mu = 1 + 4\pi K.$$

Réluctivité. — La *réluctivité* ou résistance magnétique spécifique d'un corps magnétique peut être définie comme étant l'inverse de la perméabilité de ce corps; cette quantité a pour symbole ν.

Son équation de définition est, par conséquent,

$$\nu = \frac{1}{\mu}.$$

Cette quantité physique est évidemment un simple coefficient numérique.

Circuit magnétique. — Tout flux de force magnétique se ferme nécessairement sur lui-même. Le chemin que suit un flux à travers un ou plusieurs milieux, pour se fermer, constitue le *circuit magnétique*. Par analogie avec le circuit électrique, on *admet* que le flux de force est défini par la relation

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

dans laquelle $\mathcal{F}$ est la force magnétomotrice et $\mathcal{R}$ la réluctance.

Réluctance. — Par *analogie* avec la loi d'Ohm, si l'on désigne par L la longueur d'un circuit magnétique dans le sens du flux de force qui le traverse, par S sa section normale à la direction de ce flux de force, la réluctance, qui a pour symbole $\mathcal{R}$, sera donnée par l'expression :

$$\mathcal{R} = \nu \frac{L}{S}.$$

qui est l'équation de définition de cette quantité, ν étant le coefficient numérique représentant la *réluctivité* du corps magnétique considéré.

On a également, puisque $\nu = \frac{1}{\mu}$,

$$\mathcal{R} = \frac{L}{\mu S},$$

ce qui indique que la réluctance est proportionnelle à la longueur du circuit magnétique et inversement proportionnelle aussi bien à sa perméabilité qu'à sa section transversale.

La perméabilité dépendant de l'induction, il est bien évident que la réluctance d'un circuit magnétique donné est variable avec l'induction. La réluctance est donc plus complexe que la résistance électrique. D'ailleurs tout corps, quel qu'il soit, est conducteur magnétique; il n'y a pas d'*isolant* au point de vue magnétique. Dans l'air et dans les milieux où $\mu = 1$, la réluctance est indépendante de l'induction.

Les dimensions de la réluctance sont L^{-1}.

L'unité *C. G. S.* de réluctance est celle d'un circuit magnétique ayant 1 centimètre de longueur et 1 centimètre carré de section et dont la réluctivité a pour valeur l'unité. Cette unité a reçu le nom d'*œrsted*.

En dehors des quantités magnétiques qui viennent d'être définies, l'on a constamment à faire usage de deux quantités électromagnétiques qu'il est nécessaire de mentionner ici.

Force magnétomotrice. — Pour développer un flux de force magnétique dans un circuit, au moyen d'un courant électrique, il faut lui appliquer une force magnétomotrice $\mathcal{F}$ dont la grandeur est déterminée en considérant les différentes parties constituant le circuit magnétique dans lesquelles doit passer le flux d'induction $\Phi = \mathcal{B}\ S$. On écrit que la force magnétomotrice totale doit égaler la somme des forces magnétomotrices nécessaires pour faire passer le flux dans chaque partie individuellement.

L'unité *C. G. S.* de force magnétomotrice est le *gilbert*. La force magnétomotrice produite par un courant traversant les spires d'une bobine est proportionnelle à l'intensité I du courant et au nombre N de spires de la bobine. C'est pourquoi dans la pratique, on exprime presque toujours les forces magnétomotrices en ampères-tours.

On a les relations

$$1 \text{ gilbert} = \frac{10}{4\pi} \text{ ampères-tours.}$$

$$1 \text{ ampère-tour} = \frac{4\pi}{10} \text{ gilbert.}$$

L'équation générale du circuit magnétique est la suivante :

Si on appelle l_1, l_2, l_3, etc. les longueurs des différentes parties d'un circuit magnétique,

s_1, s_2, s_3, etc. les sections de ces parties,

μ_1, μ_2, μ_3, etc. leurs perméabilités pour les inductions correspondantes,

on a

$$\mathcal{F} = \Phi \left(\frac{l_1}{\mu_1 s_1} + \frac{l_2}{\mu_2 s_2} + \frac{l_3}{\mu_3 s_3} + \ldots \right) \text{ gilberts}$$

si Φ est le flux à faire passer.

$\mathcal{F}$ s'exprime en ampères-tours en multipliant Φ par $\frac{4\pi}{10}$.

Cette équation n'est pas rigoureuse, car elle ne tient pas compte des fuites ou dérivations magnétiques ni des réluctances des joints s'il en existe.

Force magnétisante. — La force magnétisante a le même symbole que l'intensité d'un champ, car elle n'est autre que l'intensité du champ produisant l'aimantation, champ développé par un courant. L'unité *C. G. S.* de force magnétisante est le *gauss*. Dans la pratique, on emploie souvent l'*ampère-tour par centimètre*. C'est alors le quotient de la force magnétomotrice $\mathcal{F}$ (exprimée en ampères-tours) par la longueur l du circuit magnétique, longueur exprimée en centimètres.

On a

1 ampère-tour par centimètre = 1,256 gauss.
1 gauss = 0,8 ampère tour par centimètre.

Dans un solénoïde indéfini roulé uniformément, on a

$$\mathcal{F} = 4\pi N I \text{ gauss.}$$

N étant le nombre de spires du solénoïde et I l'intensité du courant en unité *C. G. S.* (nombre d'ampères multiplié par 10).

L'intensité du champ à l'intérieur du solénoïde est, en appelant l sa longueur,

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi N I}{l} \text{ gauss.}$$

Comme conséquence de la conception du circuit magnétique, on a nécessairement la relation

$$1 \text{ maxwell} = \frac{1 \text{ gilbert}}{1 \text{ œrstedt}}.$$

II

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'EXAMEN DES FERS ET ACIERS ET SUR LES MESURES MAGNÉTIQUES

Importance de la question au point de vue industriel. — Analyses chimiques. — Examen physique; microstructure. — Essais magnétiques des fers. — Influence de l'hystérésis sur les essais magnétiques. — Joint magnétique. — Qualités magnétiques généralement imposées pour la fourniture des fontes, aciers coulés, fers forgés, tôles utilisés dans les constructions électriques. — Préparation des échantillons. — Instruments de mesures magnétiques.

Importance de la question au point de vue industriel. — Les essais magnétiques des fers, fontes et aciers préoccupent actuellement beaucoup les métallurgistes élaborant ces métaux et les constructeurs qui les utilisent. Depuis longtemps déjà, l'importance des essais magnétiques est reconnue et l'on savait que, faute de données sur les qualités magnétiques des matières employées, les études et calculs relatifs aux dynamos, transformateurs, etc. restaient incomplets, en exposant le constructeur à de graves mécomptes. Des dimensions insuffisantes données aux diverses parties de la carcasse magnétique d'une machine peuvent rendre celle-ci mauvaise et même inutilisable; d'un autre côté, des dimensions exagérées à dessein, pour éviter tout aléa, conduisent à un prix de revient trop élevé.

Aujourd'hui que la construction des machines est arrivée à un degré de perfection difficile à dépasser, les industriels font tous leurs efforts pour réduire leurs prix de revient. Ils ne peuvent arriver à ce résultat que par une parfaite connaissance des matières qu'ils emploient, matières que les producteurs s'efforcent, à leur tour, d'améliorer le plus possible.

Les métallurgistes et les constructeurs sont donc tenus, à présent, de faire des essais magnétiques.

Ces essais doivent être complétés, pour le métallurgiste du moins, par des analyses chimiques et par l'examen physique des métaux et alliages qu'il prépare.

Analyses chimiques. — Les analyses chimiques des fers, fontes et aciers sont délicates, étant donné que les éléments

étrangers préexistants ou incorporés dans le métal ne s'y trouvent qu'en très faible proportion. Leur action n'en est cependant pas moins pour cela d'une grande importance, car leur présence modifie souvent d'une manière essentielle l'état moléculaire du composé, c'est-à-dire, par suite, ses propriétés physiques et magnétiques.

Nous ne pouvons entrer ici dans le détail des analyses chimiques des fers et aciers; nous nous contenterons de citer les éléments qu'on y rencontre ordinairement en faisant connaître, au point de vue magnétique, les effets qu'ils produisent.

Le fer pur est pratiquement inconnu dans la construction des machines électriques. Les fontes et aciers contiennent les principaux éléments suivants : carbone, silicium, soufre, phosphore, manganèse, aluminium, chrome, nickel, tungstène, etc.

Carbone. — Ce corps existe dans la proportion de 2,3 à 5 0/0 dans les fontes de première fusion, c'est-à-dire dans celles qui sortent du haut-fourneau. Ce carbone existe à l'état de carbure de fer dans la fonte blanche et à l'état de graphite dans la fonte grise.

Par une seconde fusion, la fonte grise abandonne du graphite et constitue la seule fonte employée dans les constructions électrotechniques.

Dans les aciers, la proportion de carbone est bien moindre; elle varie de 0,6 0/0 à 1,9 0/0. L'acier à 0,6 0/0 de carbone est le plus doux; celui qui contient le maximum de carbone, soit 1,9 0/0, est le plus fusible. Avec une teneur en carbone supérieure à 1,9 0/0, l'acier n'est plus malléable à chaud; c'est une fonte. En général, l'acier magnétique contient 0,9 0/0 de carbone; ce métalloïde n'est pas dissout dans le fer; il s'y trouve localisé et y constitue une sorte de squelette englobant les particules de fer.

Silicium. — Le silicium, introduit dans l'acier pendant sa préparation, se dissout dans les particules de fer; il a la précieuse propriété de réduire le coefficient d'hystérésis et d'augmenter la perméabilité magnétique.

Soufre et Phosphore. — La présence de ces corps dans les aciers est très préjudiciable à leurs qualités mécaniques et magnétiques; ils proviennent du minerai et on s'efforce de les éliminer. Dans le métal, ils forment des phosphures non mélangés au fer et font partie du squelette emprisonnant les grains.

Manganèse. — Le manganèse communique à l'acier des propriétés particulières qui le font rechercher comme acier mécanique, mais le font rejeter au point de vue magnétique, sauf lorsque ces aciers sont destinés à faire des aimants permanents.

Chrome, Nickel, Tungstène. — La présence de ces métaux dans

les aciers est très favorable lorsqu'on recherche un métal propre à la fabrication des aimants, mais elle rend les aciers inutilisables au point de vue de la construction des dynamos. La présence du manganèse, du chrome, etc. diminue beaucoup la perméabilité et augmente le coefficient d'hystérésis.

Aluminium. — L'aluminium incorporé dans l'acier lui communique des propriétés remarquables : faible coefficient d'hystérésis, perméabilité élevée, résistivité considérable. Cette résistivité est favorable à la réduction des courants de Foucault lorsque ceux-ci tendent à se développer. L'aluminium ne facilite pas autant que le manganèse la fusion de l'acier; c'est un inconvénient racheté amplement par les qualités précitées. Cependant, l'acier ne contenant que de l'aluminium est difficile à couler sans soufflures et le constructeur doit apporter beaucoup d'attention à la présence éventuelle de véritables poches d'air que l'on rencontre dans certaines grosses pièces fondues en acier à l'aluminium. L'addition de silicium atténue le défaut de fluidité de l'acier-aluminium et la combinaison acier-aluminium-silicium permet d'obtenir ainsi un métal doux et donnant toute satisfaction.

Examen physique, microstructure. — L'examen physique des aciers et fontes, employés dans la construction électrique, consiste surtout en recherches microscopiques destinées à reconnaître la *microstructure* du métal.

L'étude de la microstructure s'est beaucoup développée ces dernières années sous le nom de *métallographie*. Il nous est impossible de n'en pas parler et d'omettre de citer, à ce propos, les noms de MM. Osmond, Le Chatelier, Cartaud, Carnot, Charpy, etc. pour ne signaler que quelques-uns des savants français ayant contribué à développer la métallographie (1).

Dans la solidification de l'acier coulé, le phénomène commence à partir des parois du moule et se propage normalement à ces parois. Le métal se solidifie sous forme de cellules prismatiques et polyédriques enchevêtrées. On imite parfaitement ce mode de formation de cellules en comprimant des billes de plomb dans une matrice.

Sauf certains éléments que les cellules de fer retiennent, après refroidissement, à l'état de solution solide, les autres produits incorporés sont expurgés des cellules par une sorte de rochage. Ils enveloppent les cellules, ou grains de *ferrite*, d'un réseau ou squelette qui les englobe. Ce réseau se nomme *perlite*. C'est un

(1) Bulletin de la Société internationale des Électriciens, décembre 1902, p. 835, communication de M. Charpy.

entrelacement de minuscules lamelles de fer (1) (ferrite) et de carbure de fer (cémentite). La perlite contient tout le carbone du métal et donne la cohésion à l'ensemble des cellules de ferrite.

Comme nous l'avons dit, le silicium et l'aluminium se dissolvent par fusion dans les cellules de ferrite; après refroidissement, la solution solidifiée de ces corps constitue les cellules du métal.

Pour étudier la microstructure d'un acier, on en découpe un petit échantillon qu'on soumet au polissage le plus parfait possible (poli spéculaire). La surface polie est ensuite traitée ou non par divers réactifs et examinée sous un grossissement de 200 à 1000 diamètres au moyen de microscopes spéciaux. Ces instruments diffèrent des microscopes ordinaires par le mode d'éclairage de la préparation : celle-ci doit être, en effet, éclairée sous une incidence normale, la partie observée étant néanmoins perpendiculaire à l'axe optique de l'instrument.

Les microscopes des métallographes sont généralement disposés de la manière suivante : Au-dessus de l'objectif et dans le tube du microscope, on introduit un petit prisme à réflexion totale dont l'hypothénuse est inclinée de 45° sur l'axe optique. Ce prisme est assez petit pour ne couvrir qu'une faible partie du champ. Il est vivement éclairé au moyen d'une fente pratiquée dans le tube du microscope, fente dont l'ouverture est réglable.

Les rayons lumineux d'une source sont réfléchis normalement à la préparation polie qui les renvoie suivant l'axe du microscope. L'objectif contribue donc à l'éclairement de l'objet avant d'en amplifier l'image. Sans entrer dans plus de détails, faisons observer que le polissage spéculaire est long et délicat. Il demande un matériel spécial de tours à polir et l'emploi de produits à polir particuliers.

L'attaque de la surface à examiner peut s'effectuer par le polissage dit en bas-relief; il est basé sur la différence de dureté des éléments du métal, c'est la méthode sclérométrique. On peut aussi employer l'attaque chimique exercée au moyen de produits en solution suffisamment étendue. C'est ainsi que pour l'examen des aciers, on utilise l'oxydation par recuit, l'action de l'eau iodée, des acides, etc.

Enfin, M. Le Chatelier a récemment employé l'attaque électrolytique en présence de solutions appropriées avec des densités de courant très faibles (0,01 à 0,001 ampère par cm²).

(1) Examinées au microscope à la lumière oblique, ces lamelles de fer et de carbure de fer montrent des irisations comme la nacre ou la perle, d'où le nom de perlite.

Un des effets le plus caractéristique révélé par la métallographie, relativement aux aciers doux magnétiques, est l'influence du recuit à diverses températures comprises entre 140° et 900° C.

Ces recuits, la trempe et certains traitements mécaniques modifient les dimensions des cellules de ferrite et, par suite, les propriétés magnétiques.

Le recuit à une température voisine de 800° C a pour effet d'augmenter les dimensions des cellules de ferrite, ce qui a pour résultat d'augmenter la perméabilité et de réduire le coefficient d'hystérésis. Le refroidissement qui suit un tel recuit doit être lent. S'il est rapide, il se produit une véritable trempe et les grains de ferrite diminuent de volume en se brisant. Certains aciers doux laminés se trouvent dans un état particulièrement peu stable. Un échauffement limité à une température de 100° à 200°, le plus souvent voisine de 140°, et maintenu pendant 40 à 150 heures environ, suffit à faire diminuer notablement la grosseur des grains de ferrite. Le coefficient d'hystérésis augmente alors beaucoup et peut même doubler. Ce phénomène est connu sous le nom de *vieillissement;* il cause quelquefois au constructeur de graves difficultés. Des induits de machines ou des carcasses magnétiques de transformateurs, après s'être convenablement comportés pendant un certain temps, sont arrivés à s'échauffer en marche, au point de devoir être quelquefois remplacés après quelques semaines.

Toutes les tôles ne présentent heureusement pas ce phénomène d'instabilité. M. Charpy (1) a remarqué qu'il se constatait le plus souvent sur des tôles ayant donné primitivement un coefficient d'hystérésis très faible. Il a remarqué également que, seules parmi toutes les tôles examinées par lui, celles provenant d'aciers fabriqués au convertisseur Bessemer étaient susceptibles de vieillir et de présenter une augmentation du coefficient d'hystérésis par un recuit prolongé à 140° C.

Les tôles provenant d'aciers préparés au four Martin ne vieillissent pas.

Un recuit à 800° C environ, suivi d'un lent refroidissement, ramène d'ailleurs les tôles vieillies à leur état primitif et il est ainsi possible de les vieillir et de les rajeunir successivement à volonté, mais sans leur donner de stabilité.

Ces phénomènes se rattachent à ceux qu'éprouve le verre et qui produisent le déplacement du zéro des thermomètres soumis

(1) Bulletin de la Société internationale des électriciens, *loc. cit.*

à de fréquentes variations de températures. L'acier au silicium-aluminium ne serait pas exposé à subir le vieillissement. Ce genre d'acier étudié par des savants anglais, MM. Barrett, Brown et Hadfield, serait donc le métal de l'avenir.

Essais magnétiques des fers. — Au point de vue industriel, les essais magnétiques des fers sont de deux sortes :

1° Détermination des relations complexes qui relient les quantités $\mathcal{B}$, $\mathcal{H}$, et μ ;

2° Détermination du coefficient d'hystérésis ou coefficient η de Steinmetz.

Les quantités $\mathcal{B}$, $\mathcal{H}$, μ sont, comme il a été dit au chapitre I, l'induction, la force magnétisante et la perméabilité. Elles satisfont à la relation

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$$

et la détermination de l'une d'elles se déduit de celle des deux autres. On a donc à considérer au choix l'une des trois fonctions :

$$\mathcal{B} = \varphi(\mathcal{H})$$
$$\mathcal{H} = \chi(\mu)$$
$$\mu = \psi(\mathcal{B})$$

La première est celle que l'on détermine le plus souvent dans les essais industriels, car c'est la plus utilisée. Les autres, quelquefois préférées dans les laboratoires de recherches, montrent plus aisément les erreurs expérimentales lorsqu'on traduit par des graphiques les fonctions ci-dessus.

Influence de l'hystérésis sur les essais magnétiques. — L'hystérésis, dont les meilleurs fers et aciers doux ne peuvent être exempts, a pour effet d'apporter des causes d'erreur, dans certaines conditions, lorsqu'on détermine expérimentalement les fonctions $\mathcal{B} = \varphi(\mathcal{H})$, $\mathcal{B} = \chi(\mu)$ ou $\mu = \psi(\mathcal{H})$. Les inductions, développées dans le métal sous l'influence de forces magnétisantes $\mathcal{H}$, peuvent, en effet, dépendre des états magnétiques antérieurs du métal. Ces perturbations ne s'observent que si le fer subit des inductions variant successivement, sans retour du métal à l'état neutre dans les intervalles séparant chaque variation de $\mathcal{B}$. Supposons que l'on applique à un fer une force magnétisante augmentant progressivement, l'induction croîtra, mais, pour chaque valeur de $\mathcal{H}$, la valeur de $\mathcal{B}$ sera plus faible qu'elle ne

devrait être. Si la force magnétisante décroît, l'induction diminuera bien, mais aux valeurs successives de $\mathcal{H}$ correspondront des valeurs de $\mathcal{B}$ trop élevées. L'induction n'obéit donc, dans ce cas, que *partiellement* à la force magnétisante; elle *retarde* sur cette dernière, d'où le nom d'hystérésis donné à ce phénomène.

Pour éviter les inconvénients de l'hystérésis dans les mesures de $\mathcal{B}$ ou de μ, on s'y prend de la manière suivante : soit $+\mathcal{H}$ la force magnétisante à appliquer à un échantillon; on soumet l'échantillon à une succession de forces magnétisantes $+\mathcal{H}$, 0, $-\mathcal{H}$, 0, $+\mathcal{H}$. On répète même une seconde fois ce cycle pour les échantillons ayant beaucoup d'hystérésis. La dernière force magnétisante $+\mathcal{H}$ produit alors tout son effet et l'on peut obtenir la véritable valeur de $\mathcal{B}$ qui lui correspond. On opère ainsi pour toutes les valeurs de $\mathcal{H}$ que l'on désire appliquer. Les courbes de $\mathcal{B}$ et de μ ne peuvent donc correctement s'obtenir que par l'application de forces magnétisantes $\mathcal{H}$ répétées et inversées plusieurs fois pour chaque valeur de $\mathcal{H}$.

Inverser la force magnétisante entre chaque expérience est une opération qui se nomme *préparation magnétique* de l'échantillon.

Cette opération est d'autant plus indispensable que, dans bien des cas, l'échantillon fait partie d'un circuit magnétique comprenant des pièces de fer qui sont étrangères à cet échantillon. Si on négligeait la préparation magnétique, les résultats seraient faussés gravement, non seulement par l'hystérésis de l'échantillon, mais encore par celle des autres parties du circuit magnétique.

Il y a lieu de signaler également que les échantillons à étudier magnétiquement doivent avoir une faible section (1 à 2 cm^2 au plus). Dans des échantillons de grande section, le flux d'induction est difficilement uniforme. De plus, dans ce cas et en dehors de la question d'hystérésis, le flux n'obéit pas instantanément à la force magnétisante et peut mettre plus d'une seconde à le faire; cette lenteur se nomme *paresse* ou *trainage* magnétique. L'inconvénient de ce trainage est de fournir des valeurs de $\mathcal{B}$ inexactes, étant donné que le plus souvent $\mathcal{B}$ est apprécié par la décharge d'une quantité d'électricité induite, décharge qu'on suppose instantanée.

Joint magnétique. — On appelle *joint* ou contact magnétique, la surface de séparation des diverses parties d'un circuit magnétique composé. Ces joints s'exécutent soit en amenant à un contact aussi parfait que possible les pièces à réunir magnétiquement, soit en faisant pénétrer plus ou moins l'extrémité

d'une des pièces dans l'autre. Dans le premier, cas on a affaire à un joint par contact et, dans le second, à un joint par pénétration ou emboîtement.

Pour réaliser un joint par contact, on dresse, puis on polit les surfaces à rapprocher et on les amène au contact avec soin en les pressant l'un contre l'autre.

Le joint à pénétration s'exécute en tournant et polissant l'extrémité d'une des pièces, l'autre étant percée d'un trou bien cylindrique et poli dans lequel entre à frottement très doux la pièce tournée. La profondeur du trou est généralement égale à deux ou trois fois son diamètre dans les instruments de mesure.

Quel que puisse être le soin avec lequel est exécuté un joint, il donne toujours lieu à une chute de potentiel magnétique. Toutes choses égales, d'ailleurs, cette chute est fonction de l'induction.

Si on la compare à la chute de potentiel magnétique dans les parties non coupées du circuit, on peut, dans certains cas, définir le joint.

Supposons un barreau coupé en deux et dont les extrémités ainsi coupées ont été rapprochées le mieux possible après dressage. Le joint équivaut, pour une induction $\mathcal{B}$ développée dans le barreau, à une longueur $\mu\varepsilon$ de celui-ci, μ étant la perméabilité du barreau pour l'induction $\mathcal{B}$, ε étant l'épaisseur d'air du joint. Si $\mu = 2500$ pour $\mathcal{B} = 5000$, par exemple, et si $\varepsilon = 0{,}006$ mm, le joint vaut $2500 . 0{,}006 = 15$ mm de barreau. Lorsque les pièces en contact ont des perméabilités différentes pour une même induction $\mathcal{B}$, l'estimation de l'influence du joint devient pour ainsi dire impossible, même si on parvient à connaître son épaisseur.

Il faut toujours constituer un circuit magnétique de telle manière que, pour les inductions développées dans les diverses parties auxiliaires, les perméabilités y soient égales ou supérieures à celles relatives à l'échantillon.

Les pièces accessoires doivent donc être du meilleur métal magnétique et avoir une forte section.

Quelquefois, on peut négliger l'influence des joints bien dressés en laissant subsister dans le circuit magnétique un entrefer d'épaisseur constante et bien connue, épaisseur très grande par rapport à celle des joints.

Cet entrefer auxiliaire a généralement une épaisseur de 1 à 2 millimètres. Il est encore néanmoins préférable d'employer une méthode permettant d'éliminer complètement l'influence des joints.

Qualités magnétiques généralement imposées pour la fourniture des fontes, aciers coulés, fers forgés, tôles utilisés dans les constructions électriques. — L'industrie produisant aujourd'hui d'excellents matériaux magnétiques, on peut exiger généralement que ces produits permettent d'obtenir :

Une induction de 8000 gauss pour une force magnétomotrice de 60 ampères-tours par centimètre dans la fonte;

Une induction de 8000 gauss pour une force magnétomotrice de 2 ampères-tours par centimètre dans le fer forgé;

Une induction de 8000 gauss pour une force magnétomotrice de 1,96 ampère-tour par centimètre dans l'acier coulé;

Une induction de 15 000 gauss pour une force magnétomotrice de 15 ampères-tours par centimètre dans les fers forgés et dans les aciers coulés. (Dans l'air, il faut 6400 ampères-tours par centimètre pour obtenir une induction $\mathcal{B}$ de 8000 gauss, soit 0,8 ampère-tour par gauss et par centimètre);

Au point de vue de l'hystérésis, les tôles doivent avoir un coefficient η inférieur à 0,0016, si possible, et ne dépassant jamais 0,002. Le coefficient $\eta = 0{,}0016$ correspond à une perte d'énergie de 0,25 watt par kilogramme de fer à la fréquence de 100 périodes par seconde et pour une induction maximum de 6000 gauss. Un courant alternatif d'intensité efficace donnée peut, suivant la forme de sa courbe, produire des inductions maxima très différentes. Une courbe pointue donne lieu à des pertes hystérétiques plus grandes qu'une courbe sinusoïdale.

Pour une induction maximum de 6000 gauss, le coefficient $\eta = 0{,}002$ correspond à une perte d'énergie de 2,81 watts par kilogramme de fer, à la fréquence 100.

Les valeurs moyennes de l'induction $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$ que l'on peut exiger des métallurgistes pour les fontes et aciers destinés à la construction des dynamos sont les suivantes :

1° *Fontes pour carcasses magnétiques de dynamos.*

Ampères-tours par cm de longueur de circuit magnétique.	Induction à obtenir en gauss.
10	4 000
20	5 500
30	6 500
50	7 500
70	8 000
100	9 000
140	10 000

2° *Acier coulé pour carcasses magnétiques de dynamos.*

5 à 6	6 000
8 à 10	10 000
9 à 13	12 000
11 à 16	13 000
17 à 25	14 500
26 à 35	16 000
44 à 60	17 000
70 à 85	18 000

3° *Tôles en acier doux.*

1,66	8 000
3	11 000
5	13 000
7	14 000
12,6	15 000
35	16 000
80	17 000
140	18 000

Pour les pièces en fer forgé et les tôles, on prendra les chiffres relatifs à l'acier coulé; enfin on pourra imposer comme coefficient d'hystérésis $\eta = 0{,}0015$ pour les bonnes tôles à transformateurs.

Dans les marchés passés avec les fournisseurs de fers, aciers, fontes, tôles, il est prudent de laisser une petite latitude relativement aux valeurs imposées pour $\mathcal{B}$ et pour $\mathcal{H}$.

Cette marge est destinée à parer aux contestations pouvant surgir lors des réceptions, étant donné les causes d'erreurs inhérentes aux mesures magnétiques.

Il suffit d'examiner une courbe, représentant les inductions $\mathcal{B}$ en fonction des forces magnétisantes $\mathcal{H}$, pour se rendre compte de l'énorme influence que présente la moindre erreur de mesure pour certains points de cette courbe, courbe qui rappelle d'ailleurs les caractéristiques à vide des dynamos.

En dessous du coude, l'induction augmente très rapidement pour un faible accroissement de $\mathcal{H}$. Au contraire, au delà du coude, $\mathcal{B}$ augmente peu pour un grand accroissement de la force magnétisante. Cet effet est très marqué pour les fers et aciers doux. On pourra donc tolérer des écarts de 6 à 7 0/0 sur les valeurs de $\mathcal{H}$ correspondantes pour les points nettement en dessous du coude.

La tolérance sera voisine de 5 0/0 relativement aux valeurs de $\mathcal{B}$ pour les points situés au delà du coude.

Dans le cas de la fonte et des métaux peu perméables, le coude est bien plus arrondi que pour le fer et l'acier doux.

Relativement aux tôles pour induits de machine ou pour transformateurs, le découpage s'effectue dans une matrice avec poinçon guidé ou à la cisaille rectiligne ou circulaire, suivant la forme à donner à l'échantillon. Les outils devront bien couper et surtout ne pas refouler la matière.

Lors des essais hystérétiques, les tôles seront toujours expérimentées sans recuit préalable et dans l'état où elles se trouvent.

Après les premiers essais, on fera bien de refaire de nouvelles mesures, les échantillons ayant été recuits à la température de 140° C. environ, pendant une cinquantaine d'heures, à l'étuve ou au bain d'huile.

Si le coefficient η augmente à la suite de ce vieillissement artificiel, il faut rejeter la fourniture si l'on a bien spécifié ce point important du refus de tôles capables de vieillir. On pourra encore être mieux fixé en recuisant les échantillons à 800° C. pour les ramener à leur état primitif. Ce dernier recuit s'effectue naturellement en protégeant les tôles de l'action directe du feu. On peut, à cet effet, les placer dans de l'argile ou dans des boîtes en fer

La température de 140° procurant le vieillissement n'a rien d'absolu ; elle peut varier de 100° à 200° suivant les tôles, les températures intermédiaires n'amenant pas toujours le vieillissement.

Les essais de vieillissement demandent donc beaucoup de temps si on n'applique pas du premier coup la température voulue et que l'on soit obligé de tâtonner pour la trouver.

Les erreurs, en ce qui concerne les valeurs de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$, sont moins accentuées pour les tôles et la tolérance peut être moindre.

On se contente d'ailleurs souvent d'imposer une certaine induction maximum à obtenir avec une force magnétisante donnée, la moins élevée possible naturellement.

Préparation des échantillons. — Quel que soit le mode de préparation des échantillons, on devra toujours spécifier au fournisseur par quelle méthode ou avec quel instrument on compte vérifier les fournitures, aussi bien pour les mesures de $\mathcal{B} = \varphi\ (\mathcal{H})$ que pour les essais hystérétiques.

Les pièces forgées ou fondues n'étant pas recuites par le constructeur de machines, on ne devra pas recuire les échantillons des lots à vérifier.

Le travail aux machines-outils, tour, étau-limeur, etc. devra

s'effectuer avec des outils de coupe appropriée et tranchant nettement. Les passes successives d'ébauche et de finissage seront légères, afin de modifier le métal le moins possible.

On n'emploiera aucun ajustage au marteau, burin, etc., encore moins le forgeage.

Dans les pièces fondues des carcasses magnétiques des dynamos, l'usage se répand de faire venir de fonte les échantillons ou barrettes d'épreuve avec ces pièces.

Des noyaux sont, à cet effet, réservés au moulage et l'on fait ainsi venir de fonte les barettes d'épreuve. Souvent elles réunissent deux des pôles du côté du futur entrefer.

Instruments de mesures magnétiques. — Les instruments de mesures magnétiques utilisés industriellement sont les perméamètres et les hystérésimètres. Plusieurs instruments de ce genre ont été réalisés dans ces dernières années et, grâce aux perfectionnements dont ils ont été l'objet, on possède maintenant des instruments d'un emploi pratique.

L'intensité des champs magnétiques ne se détermine guère industriellement que dans le cas où l'on veut mesurer l'intensité du champ dans l'entrefer d'une dynamo.

La mesure directe des champs magnétiques s'effectue en employant l'une des méthodes suivantes :

1° *Méthode d'induction.* — Cette méthode consiste à mesurer, au moyen du galvanomètre balistique, la quantité d'électricité induite dans une bobine d'exploration disposée de manière à subir une variation de flux proportionnelle au champ dont on cherche l'intensité.

2° *Méthode de l'inductomètre.* — Elle est fondée sur la mesure de la force exercée par un champ magnétique sur un conducteur traversé par un courant d'intensité connue.

3° *Méthode de la spirale de bismuth.* — Elle est fondée sur la propriété que possède ce métal de subir un accroissement de résistance électrique lorsqu'il est soumis à l'action d'un champ magnétique.

Cette dernière méthode est la seule ayant donné naissance à des appareils utilisables dans l'industrie. Les méthodes précédentes sont plutôt du domaine des laboratoires.

Certains perméamètres industriels sont fondés sur une mesure du champ magnétique développé dans l'échantillon étudié. On peut citer parmi ceux-ci le perméamètre à lecture directe de Siemens et Halske, le perméamètre à torsion de J. Carpentier et le perméamètre de Drysdale.

III

MESURE DE L'INDUCTION $\mathcal{B}$ EN FONCTION DE LA FORCE MAGNÉTISANTE $\mathcal{H}$

MÉTHODES DE MESURE DE L'INDUCTION :

MÉTHODE BALISTIQUE OU DES VARIATIONS DE FLUX : Principe de la méthode. — Mesure de la force magnétisante $\mathcal{H}$. — Mesure de l'induction $\mathcal{B}$. — Galvanomètre balistique. — Méthodes de mesure de l'induction $\mathcal{B}$: Méthode de Rowland. Méthode d'Hopkinson. Méthode d'Ewing. Méthode dite du joug. Méthode de Picou éliminant l'influence des joints.

MÉTHODE D'ARRACHEMENT OU DE LA FORCE PORTANTE : Perméamètre J. Carpentier. — Balance magnétique du Bois. — Balance magnétique Fischer-Hinnen. — Balance magnétique Ewing. — Perméamètre de Lamb et Walker.

MÉTHODE FONDÉE SUR LA MESURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE : Mesure du champ magnétique par la méthode d'induction. – Inductomètre de Miot. — Méthode de la spirale de bismuth de Lénard. — Perméamètre Bruger. — Perméamètre Siemens et Halske. — Perméamètre à torsion J. Carpentier. — Perméamètre de Drysdale.

MÉTHODE DE COMPARAISON : Pont magnétique Ewing. — Pont magnétique Frank Holden.

L'induction $\mathcal{B}$ et la force magnétisante $\mathcal{H}$ se mesurent séparément. Pour chaque groupe de valeurs de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$, on peut déterminer la perméabité μ à l'aide de l'expression :

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}.$$

Méthodes de mesure de l'induction $\mathcal{B}$. — Les méthodes de mesure de l'induction $\mathcal{B}$ sont les suivantes :

1° Méthode balistique ou des variations de flux;
2° Méthode d'arrachement fondée sur la force portante;
3° Méthode fondée sur la mesure du champ magnétique;
4° Méthode de comparaison.

MÉTHODE BALISTIQUE OU DES VARIATIONS DE FLUX

La mesure de l'induction fondée sur celle des variations de flux exige l'emploi d'un galvanomètre balistique étalonné, car on obtient la valeur d'un flux magnétique en déterminant la quantité d'électricité passant dans un circuit de résistance connue sous l'action de la force électromotrice développée par

la suppression du flux à mesurer ou par son inversion; le flux varie alors, suivant les cas, de Φ à zéro ou de $+\Phi$ à $-\Phi$.

Soit Φ le flux à mesurer; la quantité d'électricité Q qui passe dans un circuit de résistance R contournant n fois le flux est proportionnelle à la déviation α d'un galvanomètre balistique dont la constante est k et l'on a :

$$Q = \frac{n\Phi}{R} = k\alpha.$$

Le mode opératoire exigé par l'emploi de la méthode balistique est assez délicat et l'on ne peut songer à effectuer des mesures industrielles par une méthode qui est plutôt du domaine du laboratoire.

Cette méthode n'est plus guère employée actuellement que pour étudier, une fois pour toutes, les échantillons de fer qui accompagnent les perméamètres industriels et qui servent d'étalons de comparaison.

Il était pourtant nécessaire de la décrire ici, afin de permettre à ceux qui le désireront soit de vérifier l'étalonnage des échantillons qu'ils possèdent, soit d'établir d'autres types de comparaison.

On construit d'ailleurs maintenant des galvanomètres balistiques à aiguille avec cadre mobile monté sur pivots; ces instruments, d'un usage commode, affectent la forme des voltmètres Weston.

Le coefficient de perméabilité μ d'un échantillon est donné par la relation $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$, $\mathcal{B}$ étant l'induction développée par une force magnétisante $\mathcal{H}$ dans l'échantillon à étudier. Pour les métaux magnétiques, ce coefficient numérique μ n'a de signification que lorsqu'on indique à quelle induction il correspond. Il varie dans de très grandes limites pour divers échantillons, suivant l'induction à laquelle se rapporte le coefficient et aussi suivant les inductions antérieures auxquelles un échantillon donné a été soumis. Il est donc nécessaire de tracer, pour chaque échantillon, une courbe des valeurs des inductions $\mathcal{B}$ en fonction des forces magnétisantes $\mathcal{H}$.

Avec les divers rapports $\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$ on construit facilement la courbe des valeurs de la perméabilité.

Comme on l'a dit, les valeurs de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$ se mesurent sépa-

rément. La méthode balistique permet de mesurer $\mathcal{B}$; quant à $\mathcal{H}$, on le détermine au moyen d'une mesure d'intensité de courant.

Dans l'étude d'un échantillon destiné à servir ultérieurement d'étalon, il est indispensable de toujours tenir compte des réluctances des autres portions du circuit magnétique dont il fait partie, le court circuit magnétique créé par ces portions ayant une réluctance qui est loin d'être négligeable.

D'un autre côté, l'échantillon à étalonner doit être choisi de manière à présenter une boucle d'hystérésis de surface appréciable (fig. 1, boucle de gauche). Si cette boucle a une surface très petite (fig. 1, boucle de droite), elle est beaucoup plus difficile à obtenir exactement, les erreurs relatives commises dans la détermination des valeurs de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$ ayant alors trop d'importance.

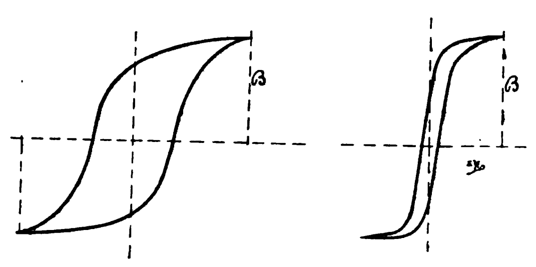


Fig. 1. — Boucles d'hystérésis de surfaces très différentes se rapportant à un fer de qualité ordinaire et à un bon acier coulé.

Mesure de la force magnétisante $\mathcal{H}$. — Nous supposerons d'abord que le circuit magnétique dont fait partie l'échantillon de longueur l ne comprend pas d'autres pièces et que sa forme permet le calcul de $\mathcal{H}$ (barreau droit très long relativement à sa section ou tore d'assez grand rayon). Soit n le nombre de spires de la bobine magnétisante enroulée autour de l'échantillon, bobine qui doit l'entourer avec le minimum de jeu pour que le flux qu'elle développe pénètre entièrement dans le métal; on a :

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi ni}{l} 10^{-1} = 1{,}256 \frac{n}{l} i,$$

i étant l'intensité du courant en ampères.

Généralement, la bobine recouvre toute la longueur de l'échantillon et $\frac{n}{l}$ n'est autre que son nombre de spires par centimètre de longueur.

Pour simplifier les calculs, on enroule la bobine de manière à avoir exactement :

$$1{,}256 \frac{n}{l} = 10,$$

ou

$$1{,}256 \frac{n}{l} = 100.$$

Dans ce cas, $\mathcal{H} = 10\, i$ ou $100\, i$ gauss.

On conçoit que, multipliée par l'un des facteurs 10 ou 100, l'intensité du courant doive être mesurée avec une *grande approximation.*

Lorsqu'on se sert toujours de la même bobine magnétisante, il est commode de graduer l'ampèremètre en gauss.

Pour cela, on multiplie chaque point de la graduation en ampères par la quantité $1,256\, \frac{n}{l}$ et on obtient ainsi les points d'une seconde graduation en gauss.

On conserve néanmoins la première graduation en ampères, afin de pouvoir étalonner facilement l'instrument.

Nous indiquerons plus loin comment on doit opérer pour calculer $\mathcal{H}$ et tenir compte de la réluctance des pièces qui complètent le circuit magnétique de l'échantillon, lorsque celui-ci n'est pas fermé sur lui-même ou est à l'état de très long barreau.

Mesure de l'induction $\mathcal{B}$. — Cette mesure s'effectue au moyen du galvanomètre balistique étalonné.

Les élongations α d'un galvanomètre dont la constante balistique est C mesurent les quantités Q d'électricité fournies par une bobine, dite *bobine d'épreuve;* lorsque cette dernière subit des variations de flux et que, fermée sur le galvanomètre, elle s'y décharge, on a alors :

$$Q = C\alpha.$$

Soit $\Phi - \Phi'$ la variation de flux que subit la bobine d'épreuve, n son nombre de spires et r la résistance totale du circuit de décharge, circuit comprenant la bobine d'épreuve, le galvanomètre et au besoin une résistance additionnelle, on a :

$$Q = (\Phi - \Phi')\frac{n}{r}.$$

Si la bobine est placée autour d'un échantillon de section s et dont l'induction varie de $\mathcal{B}$ à $\mathcal{B}'$, on a évidemment aussi :

$$Q' = (\mathcal{B} - \mathcal{B}')\frac{n\, s}{r} = C\alpha'.$$

puisque $\Phi = \mathcal{B} s$.

Lorsqu'on exprime Φ en maxwells, $\mathcal{B}$ en gauss, s en centimètres carrés et r en ohms, Q représente des microcoulombs.

La relation $Q = C\alpha$ ne s'applique que si la durée de variation

de flux subie par la bobine d'épreuve est très petite relativement à la période d'oscillation du galvanomètre.

En réalité, la décharge de la quantité Q d'électricité doit être *terminée* au moment où l'équipage mobile du galvanomètre *commence* à dévier.

On arrive à rendre la variation de flux très rapide, soit en retirant brusquement la bobine d'épreuve du champ dans lequel elle se trouve, soit en agissant sur le courant magnétisant au moyen d'un interrupteur à rupture rapide.

La période d'oscillation du galvanomètre doit être de 8 à 10 secondes. Cette durée, qui se règle en faisant varier le moment d'inertie de l'équipage mobile, est nécessaire pour que l'œil ait le temps de bien saisir la position extrême que vient occuper le spot sur l'échelle à la fin de l'élongation.

La lecture doit être faite avec beaucoup de soin; en effet, on fait souvent varier l'induction d'un échantillon de + 18 000 à — 18 000 gauss, soit une variation de 36 000 unités. D'autre part, il ne faut guère dépasser 200 divisions de l'échelle comme élongation maximum du galvanomètre. Dans ces conditions, chaque division représente

$$\frac{36\,000}{200} = 180 \text{ gauss.}$$

L'échantillon à étudier est tout d'abord travaillé de manière à présenter une forme convenable et une section bien uniforme. Il est ensuite recuit ou non, suivant les cas, puis on enroule la bobine magnétisante et on recouvre le tout de la bobine d'épreuve. De cette manière, la section de la bobine magnétisante se confond très sensiblement avec celle de l'échantillon.

Galvanomètre balistique. — Comme galvanomètre balistique, on emploie avec avantage le galvanomètre Deprez-d'Arsonval, à cadre mobile, le moment d'inertie du cadre ayant été augmenté par des masses disposées aux extrémités d'une tige horizontale, fixée par son milieu au cadre du galvanomètre. Il est préférable cependant d'utiliser un galvanomètre Deprez-d'Arsonval spécial, à cadre mobile de grandes dimensions, comme celui que représente la figure 2.

L'augmentation du moment d'inertie a été obtenue, dans cet instrument, par les grandes dimensions données au cadre mobile, ce cadre ayant une hauteur de 6,4 cm et sa longueur étant de 10 centimètres.

Grâce à cette disposition et au choix convenable des fils de

suspension, le cadre mobile a une période d'oscillation suffisamment grande (8 à 10 secondes) et l'inertie est obtenue par de la matière complètement utilisée au point de vue de la sensibilité.

Le cadre mobile, comportant 500 tours de fil de cuivre de 0,1 mm de diamètre, a une résistance de 500 ohms et la résistance critique d'amortissement est de 4000 ohms environ. Fermé sur 3500 ohms, ce galvanomètre devient donc juste apériodique. Une décharge de 1 microcoulomb dans cet instrument produit une élongation de 40 à 50 mm sur une échelle placée à 1 mètre du miroir; un courant de 10^{-8} ampère, donne une déviation de 1 mm.

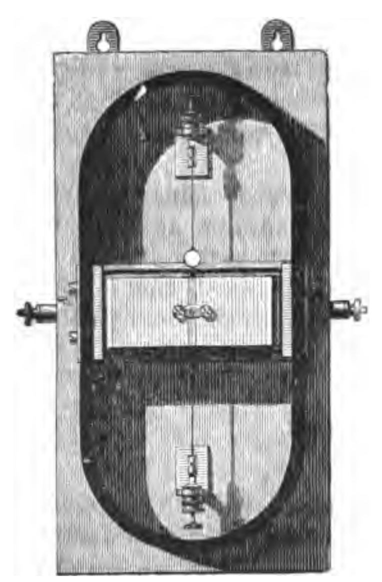


Fig. 2. — Galvanomètre balistique Deprez-d'Arsonval. Modèle J. Carpentier.

L'emploi du galvanomètre à cadre mobile comme balistique exige certaines précautions; non seulement le cadre mobile ne doit pas être enroulé sur une carcasse métallique, mais il faut de plus introduire dans son circuit une résistance suffisamment élevée pour que l'amortissement électro-magnétique soit peu important.

Comme la sensibilité se trouve ainsi notablement diminuée, il est préférable de recourir à un artifice qui consiste à rendre l'amortissement constant en laissant toujours invariable la résistance totale du circuit de décharge.

Étalonnage du galvanomètre balistique. — La quantité d'électricité *connue* que l'on fait passer dans le galvanomètre balistique pour déterminer sa constante C, par l'observation de l'élongation que provoque cette décharge, peut être obtenue de deux manières :

1° On charge un condensateur étalon de capacité connue c au moyen d'une pile étalon dont on connaît la force électromotrice e; la quantité d'électricité Q qui se décharge dans le galvanomètre est donnée par la relation :

$$Q = ce$$

et on a comme constante : $C = \frac{Q}{\alpha}$

en admettant que le condensateur se décharge entièrement;

2° On fait subir à une bobine d'épreuve une variation de flux connue en inversant ou en interrompant le courant inducteur envoyé dans une longue bobine magnétisante ne contenant pas de fer et entourée en son milieu par la bobine d'épreuve. Soit Φ le flux développé; si on interrompt le courant, la variation de flux est Φ et si on l'inverse, cette variation est 2Φ.

La quantité d'électricité passant dans le galvanomètre est alors, suivant les cas :

$$Q' = \Phi \frac{n}{r} \quad \text{ou} \quad Q'' = 2\Phi \frac{n}{r}$$

n étant le nombre de spires de la bobine d'épreuve et r la résistance totale du circuit de décharge. Pour calculer Φ, il suffit

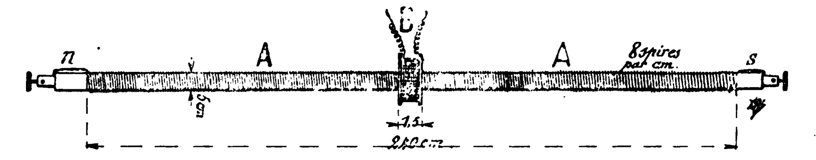


Fig. 3. — Solénoïde bobiné sur bois pour l'étalonnage d'un galvanomètre balistique.

de mesurer la section s en cm² de la bobine et de déterminer l'intensité du courant qui la traverse, le nombre $\frac{n_1}{l}$ de spires par centimètre de cette bobine étant connu.

On a en effet :

$$\Phi = \mathcal{H} s$$

et

$$\mathcal{H} = 0{,}4\pi \frac{n_1}{l} i.$$

La constante balistique C a pour valeur

$$C = \Phi \frac{n}{r\alpha} \text{ ou } C = 2\Phi \frac{n}{r\alpha'}$$

suivant que le courant inducteur a été interrompu ou inversé.

Dans ce dernier cas, $\alpha' = 2\alpha$ et la sensibilité est doublée.

A une série de valeurs de i correspond une série de valeurs de α et l'on doit avoir :

$$\frac{i}{\alpha} = \frac{i'}{\alpha'} = \text{constante},$$

si le galvanomètre balistique est réellement apte à être utilisé.

La bobine magnétisante A (fig. 3) doit avoir un diamètre beaucoup plus considérable que les échantillons de fer, afin que le flux total, qui est développé dans l'air, ait une valeur suffisante pour que son inversion produise une élongation notable.

Dans ce but, on donne aussi à la bobine d'épreuve B un grand nombre de spires.

Afin d'éviter l'influence des pôles *n s* du solénoïde A sur la bobine B, il est nécessaire de donner au solénoïde A une longueur très grande relativement à son diamètre.

L'appareil d'étalonnage du galvanomètre balistique, tel que le représente la figure 3, se compose d'un cylindre de bois dur, parfaitement rond, et d'un diamètre de 5 cm. L'enroulement,

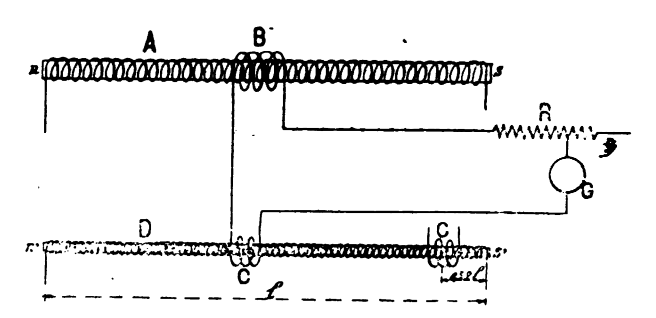


Fig. 4. — Connexions des bobines d'épreuve et du galvanomètre pour rendre l'amortissement constant.

effectué avec du fil de cuivre isolé de 0,9 mm de diamètre, est bobiné en une seule couche et comprend 1920 spires, occupant une longueur de 240 cm.

La surface limitée par une spire est de 20,6 cm² en tenant compte de l'épaisseur du fil. Le solénoïde peut supporter un courant de 8 ampères pendant quelques instants. Comme il comporte 8 spires par centimètre, on peut ainsi développer un flux de 207 *i* maxwells et avoir pour 8 ampères :

$$\Phi = 1{,}256.\ 8.\ 8.\ 20{,}7 = 1656 \text{ maxwells.}$$

On obtient, par inversion du courant, une variation de flux de 3312 maxwells.

La bobine d'épreuve B, placée au milieu du solénoïde et par-dessus l'enroulement magnétisant, a une longueur de 1,5 cm ; elle comporte 2200 spires en fil de 0,1 mm de diamètre et sa résistance est de 496 ohms.

La méthode du solénoïde est préférable à celle du condensateur pour étalonner le galvanomètre balistique. En adoptant le montage qu'indique la figure 4, l'amortissement du galvanomètre reste constant pendant toutes les mesures et il n'y a pas à s'en préoccuper.

Le circuit de décharge est toujours le même; il comprend le galvanomètre G, la bobine d'épreuve B, qui sert à l'étalonnage, et la bobine d'épreuve C enfilée sur l'échantillon de fer à étudier.

Une résistance invariable R complète le circuit. On la règle une fois pour toutes de manière que, pour la plus grande variation de flux subie par l'échantillon, l'élongation ne dépasse pas 200 divisions de l'échelle.

Le circuit de décharge restant invariable, soit pendant l'étalonnage du galvanomètre, soit pendant les essais de l'échantillon D, l'amortissement, s'il s'en produit, affecte au même degré toutes les mesures et n'a pas d'influence défavorable.

Méthodes de mesure de l'induction $\mathcal{B}$. — Nous allons indiquer maintenant les différents procédés employés pour déterminer les valeurs de l'induction $\mathcal{B}$ dans l'échantillon, en fonction de l'intensité du courant inducteur i ou de la force magnétisante $\mathcal{H}$.

Les principales méthodes usitées sont :

La méthode de Rowland;

La méthode d'Hopkinson;

La méthode d'Ewing;

La méthode dite du joug;

La méthode de Picou.

Méthode de Rowland. — Quand on emploie cette méthode, l'échantillon (qui, d'une façon générale, doit toujours avoir une faible section, de 1 à 2 cm^2, afin que les variations d'aimantation soient sensiblement aussi rapides que celles de l'intensité du courant) est de forme cylindrique et sa longueur atteint environ 300 fois son diamètre.

Cette grande longueur est nécessaire pour éviter l'action démagnétisante des pôles extrêmes n' s' sur la bobine d'épreuve C placée au milieu du barreau D (fig. 4). Le flux qui traverse cette bobine est alors uniforme.

On procède, au moyen d'un rhéostat inverseur à liquide, par augmentation ou par diminution progressive de l'aimantation et l'on obtient une série d'inductions $\mathcal{B}$, $\mathcal{B}'$, $\mathcal{B}''$, etc. Aux variations de flux $\mathcal{B}' - \mathcal{B}$, $\mathcal{B}'' - \mathcal{B}'$, etc. correspondent des élongations α, α', etc., les intensités du courant étant successivement i, i', i'', etc.

Cette méthode cumulative présente le sérieux inconvénient d'additionner les erreurs successives que l'on peut commettre lors de l'observation des élongations α, α', etc.

D'autre part, la grande longueur qu'il faut donner au barreau (2,50 m pour un barreau de 5 mm de diamètre), oblige à confectionner une bobine magnétisante qui le recouvre entièrement et dont l'enroulement est long à faire. De plus, l'échantillon est difficilement homogène à cause de ses dimensions et, s'il doit être formé de tôles minces, il est impossible à réaliser. D'ailleurs, dans la pratique, on ne rencontre jamais de barreaux de cette longueur.

M. le docteur Fleming a perfectionné la méthode de Rowland. Il a trouvé et vérifié qu'on pouvait notablement réduire la longueur de l'échantillon D, à la condition de placer la bobine d'épreuve C non plus au milieu de l'échantillon, mais en C′ aux 0,22 de sa longueur, longueur qui peut être réduite à 10 fois le diamètre ; si le barreau a 1 centimètre de diamètre, l'échantillon n'aura alors que 10 centimètres de longueur et la bobine d'épreuve sera, dans ces conditions, placée à 22 mm d'une des extrémités; la bobine magnétisante doit néanmoins être plus longue que l'échantillon afin que celui-ci soit dans une partie où le champ est uniforme.

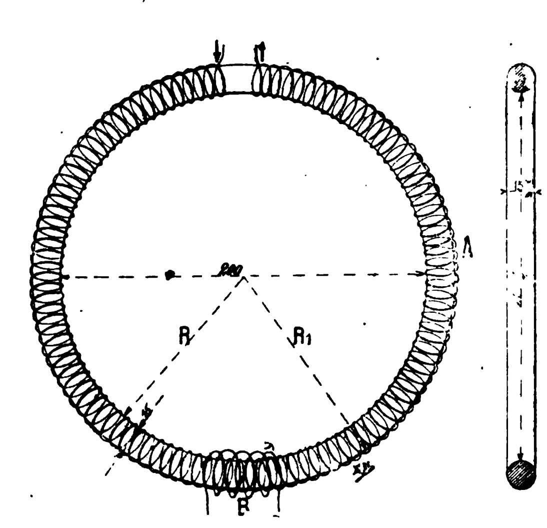


Fig. 5. — Échantillon en forme de tore.

Au lieu d'être droit et de former un circuit magnétique ouvert, l'échantillon peut affecter la forme d'un tore (fig. 5). Ce tore constitue un circuit magnétique fermé et est recouvert d'un enroulement magnétisant bobiné uniformément sur tout son pourtour, les spires étant dans tous les cas le plus rapprochées possible du fer, afin que leur section se confonde pratiquement avec la sienne.

La bobine d'épreuve est enroulée en un point quelconque R du tore, au-dessus de l'enroulement magnétisant.

Le circuit magnétique étant fermé, il n'y a pas de pôles libres. Ce circuit peut donc être court et le tore avoir un faible diamètre. Cependant, dans la pratique, le diamètre du tore doit être grand par rapport à celui de la barre qui le constitue. Ainsi, si la barre qui sert à confectionner le tore à un diamètre de 15 mm par exemple, le tore aura un diamètre d'environ 200 mm.

Si ce dernier diamètre était moindre, l'induction ne pourrait être uniforme dans une section transversale quelconque s. Ce défaut d'uniformité dans la répartition du flux tient alors à ce que la différence de longueur des circonférences de rayons R et R_1 est appréciable. La réluctance est alors plus faible vers l'intérieur du tore que vers l'extérieur. Dans ce dernier cas, l'induction mesurée serait une induction moyenne et non l'induction réelle. Soit R le rayon moyen du tore et r le rayon de la section, c'est-à-dire du cercle générateur, on a pour valeur de $\mathcal{H}$ dans le fer :

$$\mathcal{H} = \frac{2ni}{r^2}\left(R^2 - \sqrt{R^2 - r^2}\right)$$

n étant le nombre de spires de l'enroulement magnétisant.

Le tore peut être également constitué par la superposition d'anneaux de tôle découpés comme ceux des induits de dynamos.

Ce n'est même que lorsqu'on veut essayer des tôles de ce genre que l'on emploie un échantillon de cette forme qui exige des bobinages inducteur A et d'épreuve B, nouveaux pour chaque échantillon; ces bobinages sont d'une exécution assez longue.

Comme dans le cas d'un tore formé d'une barre cylindrique, le tore formé d'anneaux doit avoir un grand diamètre relativement aux côtés de la section transversale.

Soit R le rayon moyen de ce tore et $2a$ son épaisseur radiale, on a :

$$\mathcal{H} = \frac{ni}{a} \log_e \frac{R + a}{R - a}$$

Méthode d'Hopkinson. — Dans la méthode d'Hopkinson, l'échantillon affecte la forme de barreaux droits cylindriques et fait partie d'un circuit magnétique de grande section le mettant soi-disant en court-circuit magnétique; dans ces conditions, la réluctance de ce dernier peut être approximativement considérée comme négligeable par rapport à celle de l'échantillon. Au lieu de faire varier le flux en modifiant l'intensité du courant, on sépare brusquement l'échantillon coupé en deux parties préalablement juxtaposées.

La bobine d'épreuve enfilée sur l'éprouvette, se trouve à l'aplomb de la séparation des demi-barreaux formant l'échantillon. Des ressorts tendent à faire sortir la bobine de sa place. Quand on sépare les barreaux, la bobine n'est plus retenue en place par ceux-ci et elle s'échappe brusquement hors du champ magnétique.

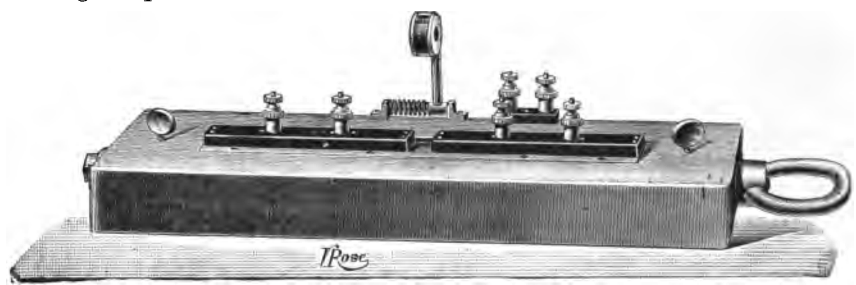


Fig. 6. — Perméamètre Hopkinson, modèle J. Carpentier.

La figure 6 montre une vue d'ensemble de l'appareil Hopkinson et la figure 7 en indique les dimensions principales.

Cet instrument se compose d'un gros cadre en fer forgé ou en acier coulé A′A′, B′B′ dont les petits côtés sont munis de trous

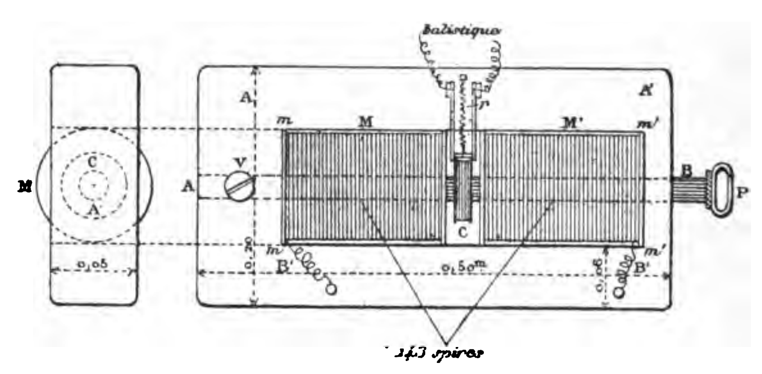


Fig. 7. — Perméamètre Hopkinson (1).

qui les traversent de part en part et qui sont situés exactement dans le prolongement l'un de l'autre.

L'échantillon AB doit entrer à frottement doux dans ces trous, de manière à réduire au minimum la réluctance des joints. Cet

(1) Par suite d'une erreur de dessin, le petit côté de droite du cadre en fer est représenté trop étroit; il a en réalité les mêmes dimensions que celui de gauche.

échantillon est coupé ensuite en son milieu et les extrémités qui doivent venir en contact sont dressées et polies avec soin.

Les bobines magnétisantes MM′ entourent les deux parties de l'échantillon; elles sont fixées au cadre par des joues mm' et dans l'espace laissé libre entre elles est placée la bobine d'épreuve C.

La partie gauche de l'échantillon est maintenue en place par la vis de pression V et celle de droite se termine par une poignée P.

Les bobines MM′ étant excitées et la bobine C étant enfilée sur l'échantillon, on tire brusquement la poignée P.

La bobine C s'échappe et subit une variation de flux de Φ à zéro. Elle se décharge dans le balistique auquel elle est reliée en fournissant une quantité d'électricité :

$$Q = \frac{ns\mathcal{B}}{r} \text{ microcoulombs,}$$

n étant le nombre de spires de la bobine d'épreuve, s la section en cm² de l'échantillon et r la résistance totale du circuit de décharge.

Quant à la valeur de $\mathcal{H}$ elle est :

$$\mathcal{H} = \frac{0{,}4\pi Ni}{l}$$

N est le nombre total de spires des bobines MM′ supposées montées en série et traversées par un courant de i ampères; l est la longueur utile de l'échantillon formé des deux barres; c'est aussi la distance qui sépare les faces internes des petits côtés du cadre en fer.

On néglige la réluctance du cadre A′A′, B′B′, ainsi que celle des joints et, de ce fait, on commet une erreur très appréciable qui peut atteindre 30 0/0 pour les inductions élevées et 15 0/0 pour les faibles inductions; $\mathcal{H}$ est ainsi trop faible.

Si le cadre a les dimensions indiquées sur la figure 7, on peut approximativement remplacer l par l', l' étant égal à l augmenté de la quantité πR, en appelant R le rayon de la barre cylindrique essayée : $l' = l + \pi R$.

On a alors :

$$\mathcal{H} = \frac{0{,}4\pi Ni}{l'};$$

l' serait ici la longueur dite effective du barreau.

Malgré le soin apporté au dressage des surfaces en contact des

barres, ce contact n'est jamais parfait et les erreurs par défaut qui affectent l'induction et la perméabilité par excès ne peuvent être estimées.

Méthode d'Ewing. — La méthode d'Ewing consiste à utiliser le perméamètre Hopkinson, mais l'échantillon à essayer est d'une seule pièce et la bobine d'épreuve demeure en place pendant la durée des essais.

Les variations de flux sont produites dans l'échantillon en

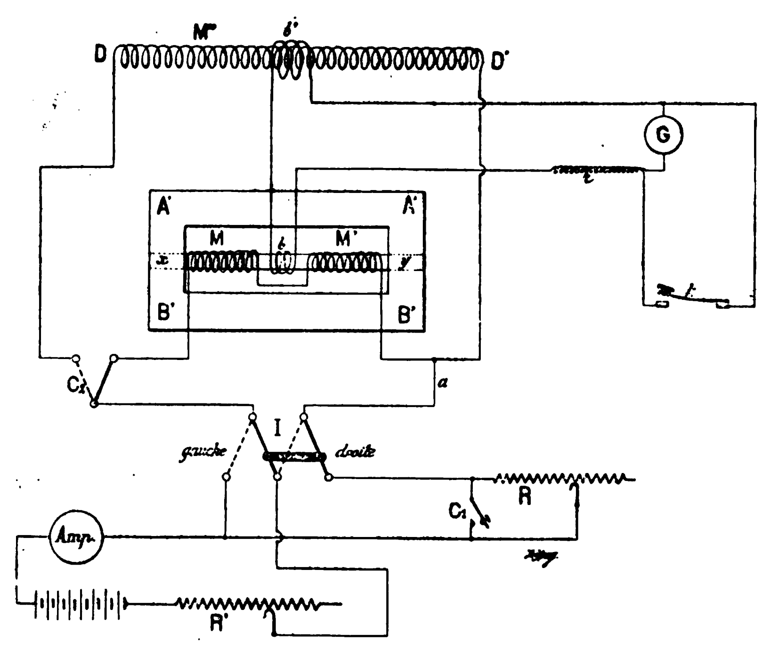


Fig. 8. — Schéma des connexions du perméamètre Hopkinson pour effectuer les mesures par la méthode d'Ewing.

modifiant brusquement l'intensité du courant qui traverse les bobines MM' (fig. 8).

Dans la méthode d'Ewing, l'échantillon est ramené à son induction maximum *après chaque observation;* l'accumulation des erreurs signalée à propos de la méthode de Rowland disparaît ainsi et c'est la principale raison qui fait préférer le mode opératoire d'Ewing aux précédents.

La figure 8 montre le schéma des connexions à établir entre les divers instruments.

L'échantillon x y, d'un seul morceau, est maintenu en place dans le cadre A'A' B'B' du perméamètre Hopkinson; il est

recouvert par les bobines magnétisantes MM′ et par une bobine d'épreuve *b*.

Le courant est fourni par une batterie d'accumulateurs et son intensité, mesurée par un ampèremètre sensible, est réglée par un rhéostat R′. Quand l'inverseur I est placé à gauche, le courant n'est réglé que par le rhéostat R′ qui sert à en limiter la valeur maximum. Au contraire, quand il est placé à droite, le rhéostat R ajoute ou non son effet au premier, suivant que l'interrupteur rapide C_1 est ouvert ou fermé.

Le courant peut d'ailleurs être dirigé par le commutateur C_2 dans les bobines MM′ ou dans l'enroulement inducteur M″ du long solénoïde sans fer DD′ qui sert à étalonner le galvanomètre balistique.

La bobine d'épreuve *b*′ de ce solénoïde est montée en série avec la bobine *b* et cet ensemble se trouve relié au galvanomètre balistique G qui comprend au besoin une résistance *r* destinée à lui donner une sensibilité convenable; c'est le montage déjà indiqué par la figure 4.

Voici comment on procède aux essais :

a). *Étalonnage du galvanomètre.* — On place la manette du commutateur C_2 sur le contact de gauche, on ferme C_1 et on donne au courant qui traverse M″ une valeur *i* voisine du maximum que peut supporter cet enroulement.

On met un instant le galvanomètre balistique en court-circuit, si cela est nécessaire, pour arrêter les oscillations du cadre mobile, en appuyant sur la clé à ressort *k*.

On pousse vivement vers la gauche l'inverseur I, on note l'élongation α du galvanomètre, puis on replace l'interrupteur I dans la position de droite.

On recommence ensuite l'opération plusieurs fois en diminuant l'intensité du courant au moyen du rhéostat R′.

Soient i, i', i'' les valeurs successives de l'intensité du courant et α, α', α'' les élongations correspondantes.

Si le galvanomètre donne des élongations proportionnelles aux variations de flux, *ce qui est indispensable,* on doit trouver :

$$\frac{i}{\alpha} = \frac{i'}{\alpha'} = \frac{i''}{\alpha''}.$$

Dans les calculs des quantités d'électricité q, q', q'', on remarquera que la variation de l'intensité du courant est successivement $2i$, $2i'$, $2i''$, puisque le courant est inversé lors de chaque observation.

Exemple : On a employé le solénoïde que représente la figure 3. L'enroulement A comporte 8 spires par centimètre et sa résistance est de 4,80 ohms.

Le diamètre du noyau de bois est exactement de 5 cm, mais le diamètre moyen des spires est de 5,125 cm, à cause de l'épaisseur du fil. La surface d'une spire, égale à la section du flux, est donc de 20,7 cm².

La bobine d'épreuve b' a une résistance de 496 ohms; elle comporte 2 200 spires.

Si nous nous reportons au montage employé et qui est représenté figure 8, la bobine d'épreuve b a 250 spires et présente une résistance de 42 ohms, celle du galvanomètre balistique étant de 125 ohms. On a donné à la résistance intercalée en r une valeur de 337 ohms de manière que, la sensibilité étant convenable dans ces conditions, le circuit de décharge ait une résistance égale à 1 000 ohms, afin de simplifier les calculs.

Le tableau suivant reproduit les observations effectuées :

Intensité du courant inducteur dans M'	Élongation α le courant variant de $+i$ à $-i$	Valeurs du rapport $\frac{i}{\alpha}$
9,00 ampères.	78 divisions.	0,125
6,50 »	52 »	0,125
5,00 »	40 »	0,125
3,50 »	28 »	0,125
2,50 »	20 »	0,125
1,00 ampère.	8 »	0,125

Calcul de la constante. — On a :

$$\mathcal{H} = 0{,}4\pi \frac{n}{l} i \qquad \left(\frac{n}{l} = 8 \text{ spires par cm}\right)$$

$$\mathcal{H} = 1{,}256 \,.\, 8i \doteq 10i.$$

Le flux a pour valeur :

$$\Phi = \mathcal{H}s = 10i \,.\, 20{,}7 = 207i$$

($s = 20{,}7$ cm²).

Le courant étant inversé au moment de l'élongation, la variation de flux est : $2.207\, i = 414\, i$.

La constante C a pour expression :

$$C = d\Phi \frac{n'}{\alpha r} \qquad \begin{aligned} n' &= 2200 \text{ spires (bobine } b') \\ r &= 1000 \text{ ohms} \\ \frac{i}{\alpha} &= 0{,}125 \text{ en moyenne.} \end{aligned}$$

On a donc :

$$C = \frac{414 \,.\, 2200 \,.\, 0{,}125}{1000} = 113{,}8.$$

La quantité d'électricité produisant une élongation quelconque, α correspond donc à $113{,}8\, \alpha$ unités *C. G. S.* de flux ou à $113{,}8\, \alpha$ maxwells ou encore à $113{,}8 \frac{\alpha}{s}$ gauss.

Si, au lieu d'inverser chaque fois le courant, on s'était contenté de l'interrompre, on aurait obtenu des élongations moitié moindres et les variations de flux n'auraient plus été que de $207\, i$. La constante serait naturellement restée la même, mais on aurait pu commettre une erreur relative double sur l'appréciation des élongations.

b). *Essai de l'échantillon.* — Le solénoïde M″ est inutilisé, mais la bobine b' reste dans le circuit de décharge, afin de ne pas modifier l'amortissement du galvanomètre. On place alors la manette du commutateur C_2 sur le plot de droite pour diriger le courant dans les bobines M M′ du cadre du perméamètre.

Le rhéostat R′ est réglé pour que le courant ait une intensité qui produise dans l'échantillon l'induction maximum ou la valeur maximum de $\mathcal{H}$ qu'on désire atteindre.

On calcule pour cela l'intensité de ce courant par l'expression

$$i = \frac{\mathcal{H} l}{0{,}4 \pi n}.$$

L'interrupteur à rupture brusque C_1 est fermé et l'on manœuvre deux ou trois fois à gauche et à droite l'inverseur I en le laissant finalement à droite. L'échantillon est ainsi *magnétiquement préparé* par les inversions successives auxquelles il a été soumis et qui ont pour but d'éliminer l'effet dû aux états magnétiques antérieurs.

Pour trouver le point A de la courbe (fig. 9), on porte, à partir

du point O, une longueur O A qui représente l'intensité maximum i_1 du courant.

On intercale alors en R une certaine résistance et on ouvre l'interrupteur C_1 qu'on referme après avoir observé l'élongation α et l'intensité i du courant affaibli.

On porte $O A' = i$ et on abaisse la perpendiculaire A'B représentant, à l'échelle, l'élongation α.

Après avoir manœuvré deux fois à gauche et à droite l'inverseur I en revenant à droite, on a de nouveau préparé magnétiquement l'échantillon.

On augmente la résistance intercalée en R et on ouvre l'interrupteur C_1. L'observation de l'élongation α' et de l'intensité i' donne le moyen de trouver le point C de la courbe.

Finalement, le rhéostat R est retiré du circuit et, quand on ouvre l'interrupteur C_1, le courant est interrompu.

On observe l'élongation α'' et, comme l'intensité est nulle, on porte $O D = \alpha''$, ce qui fournit le point D.

Fig. 9. — Tracé de la courbe des valeurs de Φ ou de $\mathfrak{B}$ en fonction de i ou de $\mathcal{H}$.

Afin de trouver les autres points de la courbe, on inverse les pôles de la batterie d'accumulateurs en laissant toujours la résistance R' constante.

Cette fois, c'est toujours à gauche qu'on doit ramener l'inverseur I, après l'avoir manœuvré entre chaque opération pour replacer magnétiquement l'échantillon dans son état primitif.

Le rhéostat R étant hors circuit, on pousse vivement l'inverseur I à droite après avoir ouvert l'interrupteur C_1 ; le courant s'interrompt et l'élongation fournit de nouveau le point D déjà obtenu.

On ferme l'interrupteur C_1, on manœuvre le rhéostat R pour intercaler le maximum de résistance et on pousse l'inverseur I à gauche, puis à droite et enfin à gauche. L'interrupteur C_1 est alors ouvert et l'inverseur I est poussé brusquement à droite. On observe l'élongation α''' et l'intensité i'''. On porte $O A''' = i'''$ et on mène $A''' E = \alpha'''$, ce qui donne le point E.

On continue de la même manière jusqu'à ce que la résis-

tance R soit devenue très faible; on obtient ainsi les points F, G, etc.

Finalement, après les inversions successives du commutateur I, on pousse brusquement sa manette de gauche à droite, en laissant l'interrupteur C_1 fermé. L'élongation α'' est maximum et l'intensité a repris la valeur i_1 qu'elle avait au début des essais On obtient ainsi le point A_1 maximum négatif de la courbe.

Il est alors possible de tracer l'axe xx', tel que les points A et A_1 lui soient symétriques. La portion de la courbe figurée en pointillé sur la figure 9 se trace symétriquement à la première partie; on peut aussi la déterminer expérimentalement, à titre de vérification.

On a $O_1 D_1 = O_1 D$; $A'_1 B_1 = AB$; $A'''E = A_1''' E_1$, etc. La courbe complète est celle des valeurs du flux Φ en fonction de i.

Sachant que $\Phi = \mathcal{B}s$ et que $\mathcal{H} = 0{,}4\pi \frac{n}{l} i$, il est facile de trouver la perméabilité qui correspond à chaque point de la courbe.

On a :

$$\mu = \frac{\frac{\Phi}{s}}{\frac{0{,}4\pi ni}{l}} = \frac{\Phi l}{0{,}4\pi nis} = \frac{\mathcal{B} l}{0{,}4\pi ni},$$

l étant la longueur utile du barreau essayé, exprimée en centimètres, c'est-à-dire la distance intérieure des petits côtés du cadre et s étant la section du barreau exprimée en cm^2.

Généralement, on fait $s = 1$ cm^2 et $\frac{0{,}4\pi n}{l} = 10$; la courbe donne alors directement les valeurs de $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$.

Lorsque la courbe ADA_1D_1A appelée, comme on sait, boucle d'hystérésis, est tracée en employant, pour les abscisses $\mathcal{H}$ et les ordonnées $\mathcal{B}$, des échelles exprimant $\mathcal{B}$ et $\mathcal{H}$ en unités *C. G. S.*, on pourrait, en planimétrant la surface qu'elle limite, calculer, pour le fer essayé, la perte hystérétique par cm^3 et par cycle d'aimantation correspondant à l'induction maximum $\mathcal{B}$ représentée par la valeur de A.

Soit S cette surface en cm^2, on a comme perte w_h exprimée en watts par cm^3 et par cycle :

$$w_h = \frac{S}{4\pi 10^7}.$$

Le tracé de la courbe fournit donc en même temps les valeurs

de μ et la perte hystérétique pour l'induction maximum atteinte; la relation

$$w_h = \eta \mathfrak{B}^{1,6}.$$

sert à calculer aisément le coefficient η de Steinmetz. Le coefficient η ainsi obtenu n'est en réalité exact que si le circuit magnétique ne contient pas d'autre fer que l'échantillon. On peut donc planimétrer la courbe figure 9 si on l'a obtenue en partant de l'anneau (fig. 5). Dans le cas actuel, l'échantillon étant disposé dans l'appareil figure 7, il est inutile de planimétrer la courbe, car le résultat serait sans valeur.

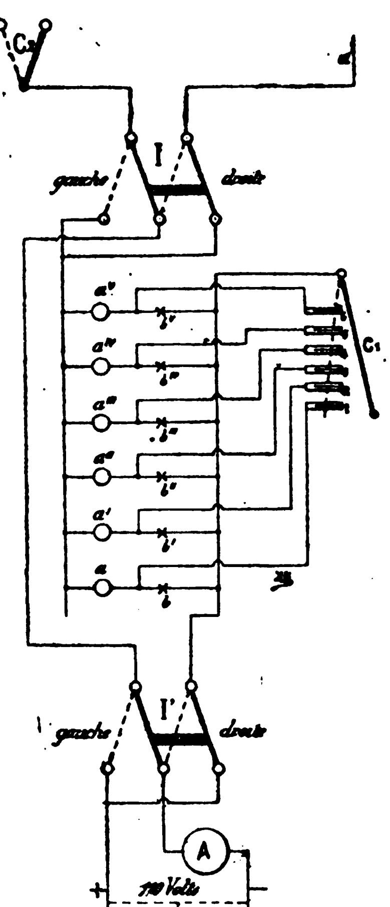


Fig. 10. — Tableau de lampes, à deux systèmes d'allumage, servant de rhéostat.

La réluctance du cadre en fer et des joints a été négligée dans l'application de la méthode d'Ewing; nous verrons comment on peut la mesurer une fois pour toutes pour chaque induction, afin de corriger les résultats d'expériences.

Il y a lieu de remarquer que le rhéostat R (fig. 8) doit permettre de très grandes variations de résistance, puisqu'il a pour objet de diminuer graduellement l'intensité du courant de son maximum jusqu'à zéro.

On peut remplacer avec avantage les rhéostats R R' par le dispositif que représente schématiquement la figure 10. Il se compose d'un petit tableau de 12 lampes à incandescence (dont 6 seulement ont été indiquées) comprenant deux inverseurs I I', un ampèremètre A et un interrupteur spécial C_1. Chaque lampe a, a', a'', etc., peut être allumée individuellement en manœuvrant de petits interrupteurs b, b', b'', etc.

La totalité des lampes peut, d'autre part, être allumée d'un seul coup, indépendamment des interrupteurs b, b', en poussant vers la gauche la manette C_1 qui vient toucher les frotteurs isolés 1, 2, 3, etc. Cette manette est assez longue, afin que les lampes qui doivent toutes s'allumer ou s'éteindre par son intermédiaire le soient en même temps. Si l'on craint que la manette C_1 n'allume pas exactement en même temps toutes les lampes, on interrompt le courant en I′, on pousse la manette C_1 vers la gauche et on ferme ensuite le circuit en I′. Lorsque la manette C_1 est poussée vers la droite, les lampes dont les interrupteurs b, b', etc., sont fermés restent seules allumées.

Ce tableau est alimenté par une distribution à 110 volts et le perméamètre Hopkinson est monté en série avec lui en a et C_2, qui sont les points correspondants indiqués sur la figure 8.

Pour obtenir les points de A à D de la courbe (fig. 9), l'inverseur I′ est placé à gauche.

On manœuvre l'inverseur I et l'interrupteur C_2 comme il a été dit précédemment, les variations d'intensité obtenues par la manœuvre du rhéostat R étant cette fois fonction de la position des interrupteurs b, b', etc. Le courant peut varier peu à peu de i_{max} à zéro en manœuvrant un à un les interrupteurs b, b', etc.

On obtient les points D à A_1 de la courbe en plaçant l'inverseur I′ à droite et en manœuvrant I et C_1 comme précédemment. On modifie chaque fois le nombre de lampes allumées au moyen des interrupteurs b, b', etc. Le courant peut alors varier de i_{max} à $-i_{max}$. Ce tableau, une fois installé, constitue un ensemble commode lorsqu'on a à exécuter souvent des essais de perméabilité; sa construction est d'ailleurs facile et peu coûteuse.

Dans la première partie de l'opération, on éteint successivement chaque lampe à l'aide des interrupteurs b, b', etc. Dans la seconde partie, on les rallume l'une après l'autre en effectuant une mesure chaque fois.

Méthode dite du joug. — Afin de pouvoir effectuer les corrections dont nous avons parlé, relatives à la réluctance du cadre et des joints, on place dans le cadre d'Hopkinson un échantillon étudié de la manière suivante, indiquée par M. Ewing, et connue sous le nom de méthode du joug. On prend deux barreaux dont la section et la longueur correspondent à l'échantillon du perméamètre Hopkinson et on les enfile, comme le montre la figure 11, dans les trous percés à travers deux blocs BB′ en fer de forte section constituant les jougs.

Les bobines magnétisantes M M′ M_1 M'_1 entourent deux par

deux les barreaux *ab*, *a' b'*. Ces bobines ont toutes même longueur et même nombre de spires par centimètre.

L'ensemble des blocs, des bobines et des barreaux remplace l'instrument d'Hopkinson. On effectue une première série d'expériences comme il a été dit précédemment, les quatre bobines étant reliées en série et le flux se fermant par les barreaux et les blocs. A ce moment, la longueur des deux barreaux comprise entre les blocs est l pour chacun d'eux soit $2l$ pour l'ensemble.

Cela fait, on enlève le bloc B' et les deux bobines M_1' M', puis on replace le bloc B' de manière que les extrémités de droite des barreaux dépassent notablement et que leur longueur mesurée entre les faces internes des blocs soit $\frac{l}{2}$. On recommence alors les essais.

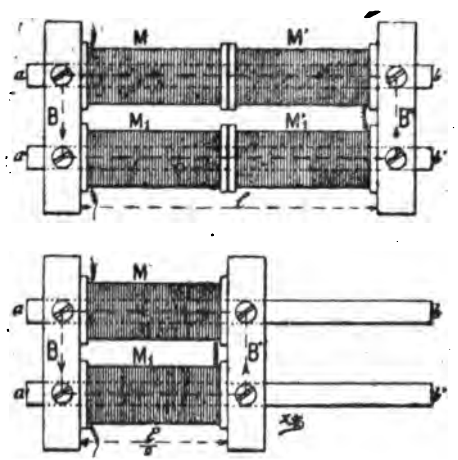


Fig. 11. — Appareil d'Ewing à deux barreaux pour éliminer l'effet des réluctances des culasses et des joints.

Pour chaque point de la courbe obtenue au moyen des élongations α, α', α'', etc., de la première série d'expériences, on a, en désignant respectivement par $\mathfrak{B}'$, s', $\mathfrak{R}$ l'induction, la section et la réluctance des blocs BB' (joints compris) :

$$\frac{2\mathfrak{B}l}{\mu} + \mathfrak{B}' s \mathfrak{R} = 0,4\,\pi\, ni$$

$\mathfrak{B}$, l et μ se rapportent aux barreaux et n est le nombre de spires par centimètre des bobines M,

Dans la seconde série d'essais, on règle les intensités du courant de manière à reproduire les mêmes élongations α, α', α'', et on a, pour un point correspondant à celui de la première série et puisqu'il n'y a plus que deux bobines magnétisantes :

$$\frac{\mathfrak{B}l}{\mu} + \mathfrak{B} s \mathfrak{R} = \frac{1}{2}\, 0,4\,\pi\, ni'$$

De ces deux équations, on tire la valeur réelle de μ, indépendamment de l'effet des blocs et des joints.

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}l}{0,4\,\pi\, n(2i - i')}$$

On obtient ainsi, par la comparaison de chaque groupe d'expériences ayant donné une même élongation, une série de valeurs exactes μ, μ', μ'' de l'échantillon.

Un des barreaux ainsi complètement étudié peut alors, si on veut, être reporté dans le perméamètre Hopkinson et soumis de nouveau aux essais; on trouve une suite de valeurs μ_1, μ'_1, μ''_1 différentes des valeurs réelles μ, μ', μ''.

On a alors les éléments nécessaires pour effectuer les calculs des corrections à faire subir aux résultats lors des essais ultérieurs et pour chaque valeur de l'induction dans le cadre en fer. On a, en effet, avec le perméamètre Hopkinson, en tenant compte de la réluctance du cadre et des joints :

$$\frac{\Phi l}{\mu s} + \frac{\Phi l'}{\mu' s'} = 0{,}4\,\pi\, ni$$

expression dans laquelle

Φ = le flux total;

l = longueur du barreau;

l' = longueur moyenne du flux dans le cadre;

μ' = perméabilité de celui-ci pour l'induction $\mathcal{B}' = \frac{\Phi}{s'}$;

s' = la section du cadre.

Connaissant la perméabilité réelle μ du barreau pour l'induction $\frac{\Phi}{s'}$, il est facile de calculer le terme $\frac{\Phi l'}{\mu' s'}$ et de dresser une courbe de cette expression pour diverses valeurs de Φ; il ne reste que les erreurs relatives aux joints; elles ne peuvent être estimées et l'on est obligé de supposer que les réluctances des joints sont les mêmes dans les deux expériences.

Le procédé du joug est en somme assez laborieux, mais il offre l'avantage d'étudier l'échantillon une fois pour toutes. Il est alors possible d'employer le perméamètre Hopkinson pour d'autres déterminations relativement rapides et suffisamment exactes. Les constructeurs emploient toujours cette méthode pour étalonner les barreaux types fournis avec les perméamètres industriels.

Méthode de Picou éliminant l'influence des joints. — Si l'on se propose d'effectuer des mesures d'induction magnétique sur des tôles, le dressage des joints n'est plus possible avec une chance d'approximation quelconque et aucun des perméamètres, actuellement connus, n'est approprié à ces mesures.

M. Picou est l'auteur d'une méthode qui permet d'éliminer

complètement l'influence des joints, méthode appelée à rendre de grands services car, si on peut, à la rigueur, obtenir des joints suffisants avec des barreaux pleins, il est matériellement impossible d'arriver à ce résultat avec des tôles. Pourtant, il est aujourd'hui indispensable d'essayer les tôles aussi bien que les fers massifs au point de vue magnétique et il importe que la préparation des éprouvettes ne constitue pas un empêchement à la vulgarisation de cette catégorie de mesures trop négligées jusqu'à présent.

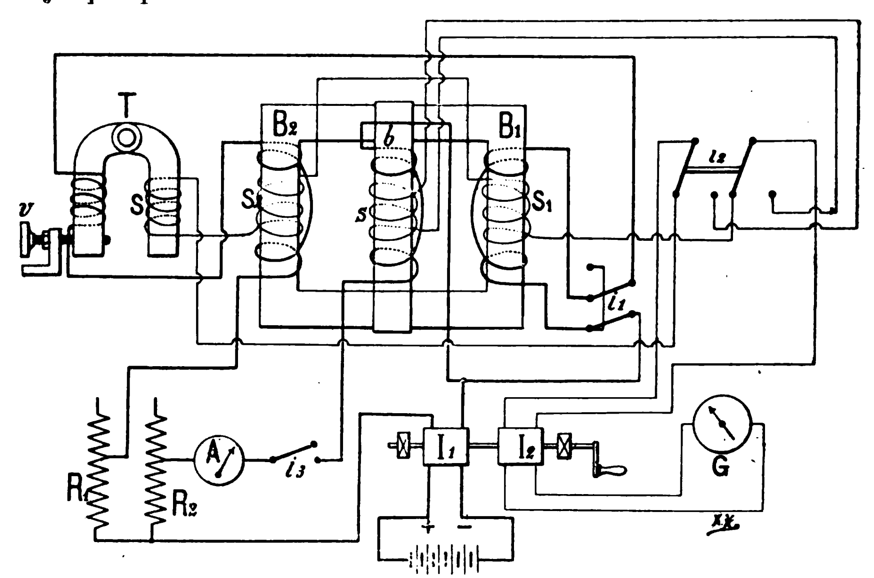


Fig. 12. — Schéma des connexions du perméamètre universel R. V. Picou.

Le principe du perméamètre universel, imaginé par M. Picou, est le suivant :

L'échantillon *b* (fig. 12), qui peut être constitué par un barreau massif ou par une pile de tôles, est enserré entre deux culasses B_1, B_2 en tôles isolées. Les joints magnétiques existant aux contacts de l'échantillon et des culasses n'ont pas besoin d'être très soignés; il suffit de ne pas les modifier pendant les expériences. A cet effet, un système de verrous maintient tout l'ensemble invariablement réuni. Des enroulements magnétisants, représentés en traits forts sur la figure 12, recouvrent les culasses B_1 B_2 et l'échantillon *b*.

Dans une première expérience, les bobines placées sur les culasses sont seules excitées; elles sont montées en série et

donnent des flux de même sens. Il en résulte que l'échantillon, réunissant deux points des culasses ayant le même potentiel magnétique, reste à l'état neutre.

Le flux développé par les bobines des culasses traverse celles-ci, les joints et les parties encastrées de l'échantillon. Soit Φ la valeur de ce flux.

Dans une seconde expérience, on inverse le courant dans la bobine de la culasse B_1 en lui conservant la même intensité que précédemment.

La distribution du flux est ainsi modifiée et le système réalise

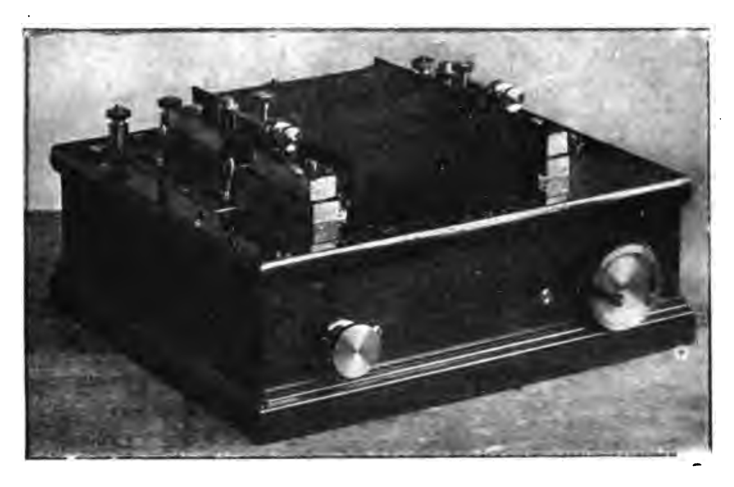


Fig. 13. — Perméamètre universel R. V. Picou.

deux pôles conséquents aux extrémités de l'échantillon. La force magnétomotrice totale n'a pas changé, mais le flux doit traverser l'échantillon en plus de son parcours primitif. Ce flux est donc affaibli. On le ramène à la valeur Φ en développant autour de l'échantillon *b* une force magnétomotrice complémentaire. Cette dernière est produite uniquement au moyen de la bobine placée sur l'échantillon; en mesurant cette force magnétomotrice et en déterminant le flux Φ traversant l'échantillon, on a tous les éléments permettant de connaître l'induction produite dans cet échantillon, en fonction de la force magnétisante.

Les réluctances des joints sont restées nécessairement les mêmes dans les deux expériences, puisque l'on n'a pas modifié la position des pièces. Les équations suivantes montrent comment *s'élimine l'effet* de ces réluctances, dont on ne pourrait d'ailleurs pas connaître les valeurs absolues.

Appelons : $\mathcal{F}$ la force magnétomotrice développée sur l'une des culasses B_1 B_2 (on suppose qu'elle est la même pour chacune d'elles);

$\mathcal{F}_1$ la force magnétomotrice complémentaire développée sur l'échantillon *b*;

$\mathcal{R}$ la réluctance d'une culasse et des deux joints qui lui correspondent (on suppose qu'elle est la même pour les deux culasses);

$\mathcal{R}_1$ la réluctance de l'échantillon.

Le premier essai donne :

$$\mathcal{F} = \Phi . 2\mathcal{R}$$

Le second essai se traduit par :

$$\mathcal{F} + \mathcal{F}_1 = \Phi . 2\mathcal{R} + 2\Phi . \mathcal{R}_1$$

D'où, par différence :

$$2\Phi . \mathcal{R}_1 = \mathcal{F}_1$$

Φ se mesure avec un galvanomètre balistique, comme on l'indique plus loin.

$$\mathcal{F}_1 = \frac{0{,}4\pi N I}{L}$$

En appelant N le nombre de spires de la bobine magnétisante placée sur l'échantillon *b* de longueur *L* et *I* l'intensité du courant en ampères circulant dans cette bobine, $\mathcal{F}_1$ n'est autre chose que $\mathcal{H}$ et $\mathcal{B}$ s'obtient en divisant Φ par la section *s* de l'échantillon; la valeur de $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$ est donc déterminée.

Toute la difficulté à surmonter dans l'application de cette méthode si simple réside dans la reproduction exacte du flux Φ dans les deux expériences. Voici comment y est arrivé M. Picou, grâce à un artifice ingénieux suggéré par M. Armagnat.

Le flux Φ développé pendant la première expérience est repéré de façon à pouvoir être exactement reproduit pendant le second essai et à cet effet le courant magnétisant agissant sur les culasses B_1 B_2 traverse également l'enroulement primaire d'un transformateur T (fig. 12) à entrefer variable. Cet enroulement est placé sur le noyau de gauche du transformateur et la vis *v* sert à rapprocher ou à éloigner ce noyau de celui situé à droite. Dans ce but les deux noyaux sont articulés autour d'une charnière.

Le noyau de droite porte un enroulement S monté en série avec des bobines d'épreuve S_1 S_2 respectivement disposées sur les culasses B_1 B_2.

Le circuit des bobines S S_1 S_2 est relié à un galvanomètre balistique et la bobine S est montée en opposition avec S_1 et S_2 de manière à développer une force électromotrice de sens inverse à celles qui sont produites en S_1 et S_2, lorsqu'on fait varier le flux dans les culasses et dans le transformateur.

Pour repérer le flux Φ, on tourne le commutateur I_1 I_2 au moyen d'une manivelle. Le courant magnétisant est interrompu, puis rétabli à chaque tour par le tambour I_1. Le tambour I_2 constitue un inverseur et donne, dans le galvanomètre balistique G, un sens constant au courant induit résultant développé dans les bobines S S_1 et S_2.



Fig. 14. — Galvanomètre balistique Carpentier.

En faisant varier l'entrefer du transformateur, on modifie son coefficient d'induction mutuelle et on peut annuler le courant induit résultant. Le galvanomètre G reste donc au zéro lorsqu'on tourne la manivelle et que le transformateur a son entrefer réglé. Le flux Φ est ainsi *repéré* mais non *mesuré*. On a soin de ne plus toucher au transformateur T et de ne plus agir sur le rhéostat R afin de conserver la même valeur au courant magnétisant en B_1 et B_2.

Pour effectuer la seconde expérience, on ferme l'interrupteur i_3 afin d'exciter la bobine magnétisante placée sur l'échantillon *b*; on manœuvre l'inverseur i_1, pour renverser le courant inducteur dans la bobine placée sur B_1 ; puis, tournant la manivelle, on règle le rhéostat R_2 jusqu'à ce que le galvanomètre se maintienne au zéro.

Le flux est donc le même que dans le premier essai.

Il reste à le mesurer. A cet effet, on utilise la bobine d'épreuve

s placée sur l'échantillon et on la met en relation avec le galvanomètre balistique G; il suffit, pour cela, de pousser le commutateur I_2 vers la droite. La rotation de la manivelle produit une élongation au balistique. Celle-ci donne une mesure du flux si le galvanomètre a été préalablement gradué à cet effet (1). Les indications de l'ampèremètre A suffisent pour déterminer la force magnétomotrice appliquée à l'échantillon seul, lorsqu'on connaît le nombre des spires de la bobine inductrice recouvrant cet échantillon.

Il faut donc en définitive deux expériences pour la détermination de chaque groupe de valeurs correspondant à l'expression $\mathcal{B} = \varphi(\mathcal{H})$.

Mode opératoire :

1° On règle le rhéostat R de manière à obtenir une certaine valeur Φ du flux; i_3 est ouvert, i_1 est dirigé vers le bas et i_2 disposé à gauche;

2° On tourne la manivelle du commutateur I_1 I_2 et l'on amène le balistique à zéro par la manœuvre de la vis v du transformateur;

3° On ferme i_3, on relève i_1 vers le haut, puis, tournant la manivelle, on amène le balistique à zéro en agissant sur le rhéostat R_2;

4° On pousse i_2 à droite et un tour de manivelle fournit l'élongation que mesure le balistique;

5° On lit la déviation de l'aiguille de l'ampèremètre A lorsque le commutateur tournant est au repos et sur contact.

On recommence ces cinq opérations pour chaque valeur donnée à l'intensité du courant que règle le rhéostat R, courant dont l'intensité n'a pas besoin d'être connue.

Le perméamètre de M. Picou est représenté dans son ensemble par la figure 13, tel que le construit M. J. Carpentier.

Les culasses, l'échantillon et les bobines sont disposées sur le dessus de la boîte.

A gauche de cet ensemble, on aperçoit les manettes des commutateurs i_1 i_2. Sur la face avant de la boîte, on remarque, à droite, la manivelle motrice du commutateur tournant I_1 I_2 et, à gauche, la vis v actionnant le transformateur à pincette. Ces deux organes sont situés à l'intérieur de la boîte. Celle-ci comprend enfin une série de bornes permettant de fixer les conducteurs reliant l'instrument à la source de courant, aux rhéostats et au galvanomètre balistique.

(1) Voir étalonnage du galvanomètre balistique, p. 26.

Il est évident que pour effectuer des essais, on peut se servir d'un galvanomètre balistique quelconque pourvu qu'il soit préalablement étalonné. La longueur effective L du barreau est égale à celle séparant les points d'encastrement de celui-ci ; ceci n'est exact qu'à la condition que les joints soient bien établis. Avec de mauvais joints, la longueur effective serait inconnue et, en tout cas, supérieure à la partie comprise entre les points d'encastrement ; cette longueur effective pour un joint moyen est indiquée par le constructeur.



Fig. 15. — Rhéostats et ampéremètre du perméamètre universel R. V. Picou.

Le perméamètre, tel qu'il est représenté figure 13, est complet ; mais il est nécessaire d'avoir, en outre, pour faire des mesures :

1° Des rhéostats R_1 et R_2 (fig. 12) servant à régler l'intensité du courant principal et du courant auxiliaire :

2° Un ampèremètre A pour mesurer l'intensité I du courant principal ;

3° Un galvanomètre balistique G.

4° Une batterie de 5 à 6 éléments d'accumulateurs pour obtenir une intensité de champ $\mathcal{H}$ égale à 100 gauss. Le courant principal et le courant auxiliaire peuvent être pris sur la même batterie.

Pour ceux qui n'ont pas à leur disposition ces divers instru-

ments, M. Carpentier, constructeur du perméamètre, a établi un modèle de galvanomètre balistique spécial à aiguille (fig. 14), gradué directement jusqu'à 20 000 gauss et, d'autre part, un ensemble constitué par deux rhéostats et un ampèremètre, ces trois instruments étant montés sur un socle unique (fig. 15). L'ampèremètre porte deux graduations : l'une en milliampères, l'autre en gauss.

MÉTHODE D'ARRACHEMENT OU DE LA FORCE PORTANTE

Les essais de perméabilité par la méthode d'arrachement s'effectuent industriellement à l'aide de l'un des instruments suivants :

Perméamètre Carpentier,
Balance magnétique du Bois,
Balance magnétique Fischer-Hinnen,
Balance magnétique Ewing,

Perméamètre Carpentier. — Cet instrument (fig. 16) est disposé pour effectuer les mesures de perméabilité par la méthode d'arrachement. La force portante F d'un barreau aimanté est exprimée, en dynes, en fonction de l'induction magnétique $\mathcal{B}$ et de la section S du barreau, par la formule :

$$F = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi},$$

ou en grammes par l'expression :

$$F = 4{,}06 . 10^{-5} \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}$$

Ce perméamètre donne rapidement des résultats lorsqu'on ne recherche pas une grande précision. Il se compose (fig. 17) d'un cadre en fer P de section notablement plus grande que celle de l'échantillon AB qui affecte la forme cylindrique. Ce cadre est analogue, d'ailleurs, à celui de l'appareil d'Hopkinson. En A, l'extrémité de l'échantillon est parfaitement dressée ainsi que la portion du cadre contre laquelle elle s'applique. En B, l'échantillon traverse à frottement doux l'épaisseur du cadre P. Une bobine magnétisante M entoure l'échantillon qui se termine par une pince B.

L'effort de traction nécessaire pour produire l'arrachement s'obtient en tournant la manivelle m qui commande la vis V.

Ce mouvement de rotation produit le déplacement d'un écrou D muni d'un index, mobile devant la règle divisée R.

En se déplaçant vers la gauche, l'écrou D tire en B sur l'échantillon par l'intermédiaire des balanciers BC, DC′ articulés en o et o'. La tension du peson R′ mesure l'effort.

Pour faire un essai, on excite la bobine avec un courant d'intensité connue et on applique exactement en A l'extrémité de l'échantillon, de manière à avoir une répartition uniforme du

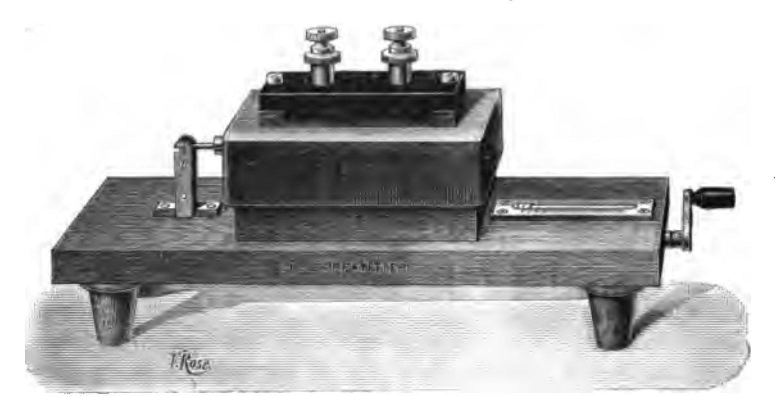


Fig. 16. — Perméamètre à arrachement J. Carpentier.

flux dans toute la surface de contact A. On tourne lentement la manivelle m jusqu'au moment où se produit l'arrachement.

La valeur de $\mathcal{H}$ est donnée par les indications de l'ampèremètre et la connaissance du nombre de spires de la bobine M.

La perméabilité a pour expression :

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi F.981}{\mathcal{H}^2 S}},$$

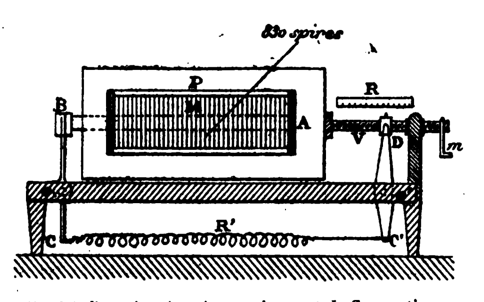


Fig. 17. Perméamètre à arrachement J. Carpentier.

F étant l'effort d'arrachement mesuré en R et exprimé en grammes et S la section en centimètres carrés de l'échantillon. $\mathcal{H} = 0,4 \pi ni$, n étant le nombre de spires par centimètre de la bobine M et i l'intensité du courant en ampères. Toute la précision dépend du dressage plus ou moins parfait des surfaces en contact A.

Pour une force magnétisante $\mathcal{H}$ donnée, l'effort est, en effet

minimum quand le flux est uniforme en A et l'on voit que l'on peut trouver pour F et, par conséquent, pour μ, des valeurs d'autant plus élevées que le dressage des surfaces est moins parfait et le contact en A moins intime.

Comme c'est le cas qui peut se présenter le plus fréquemment, il faut s'attendre à trouver souvent des perméabilités trop fortes.

Balance magnétique du Bois. — Cet instrument, dont les figures 18 et 19 montrent une vue d'ensemble et un croquis théorique, est, comme le précédent, disposé pour effectuer des mesures de perméabilité par la méthode d'arrachement.

Il se compose de deux gros blocs en acier C, C′, dont les parties supérieures ont même section et sont parfaitement dressées.

L'échantillon AB, entouré d'une bobine magnétisante M, réunit les deux blocs qu'il traverse.

Afin que le contact soit intime entre le barreau et les blocs, le barreau est serré entre deux demi-cônes en fer, qu'on visse entre le barreau et les blocs au moyen d'une clé.

Au-dessus des blocs C, C′, se trouve une masse DE en acier coulé, montée sur couteaux I. Le côté E est plus lourd que le côté D, afin d'obtenir l'équilibre de ce système de fléau, malgré la légère excentration des couteaux I supportés par la traverse H.

En regard des parties supérieures des blocs C, C′, le fléau se termine par des épanouissements bien dressés et de même section que les blocs.

A la partie supérieure du fléau, on voit une tige le long de laquelle on peut déplacer le contrepoids G, dont l'index est mobile devant les divisions d'une règle graduée *ab*.

Les surfaces en regard des blocs C, C′ et des épanouissements du fléau ne doivent jamais venir en contact. Il reste toujours entre ces parties un entrefer dont l'épaisseur est de 1 mm du côté où le fléau est incliné.

Une cale de 1 mm d'épaisseur sert à vérifier cette condition.

Pour régler la balance, on place la cale en *e*, puis on appuie en E sur le fléau, de manière à la serrer. On agit enfin sur la vis V jusqu'à ce qu'elle vienne toucher la butée *f*.

On opère de même du côté D, en transportant la cale en *e′* et en agissant sur la vis V′ après avoir appuyé en D.

Le contrepoids G étant au zéro de sa graduation et la bobine M n'étant pas excitée, on amène la balance à l'équilibre en réglant la position du petit contrepoids V″.

Pour faire une mesure, on excite la bobine M avec un courant d'intensité connue. L'équilibre est détruit et on le ramène en déplaçant convenablement le contrepoids G.

La valeur de $\mathfrak{B}$ est proportionnelle à $\sqrt{d}$, d étant la distance du poids G au zéro de l'échelle *ab*.

Les flux en *ee'* sont égaux; si cependant le fléau s'infléchit du

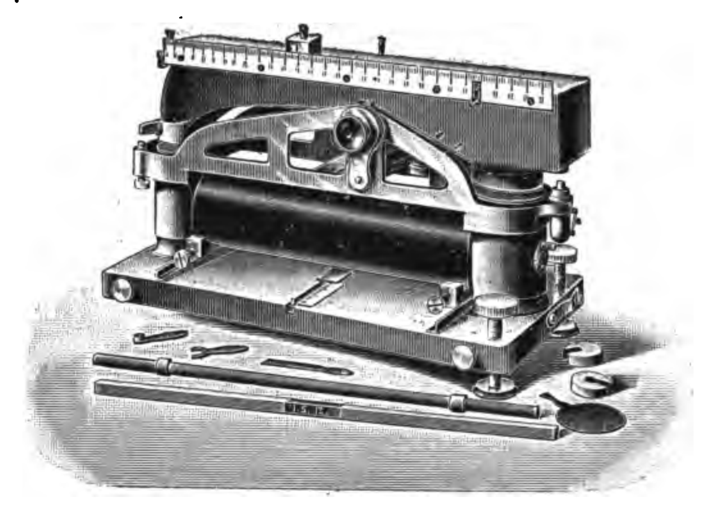


Fig. 18. — Balance magnétique du Bois.

côté *e'* quand on excite la bobine, cela tient à ce que l'excentrage des couteaux I rend inégaux les moments des couples.

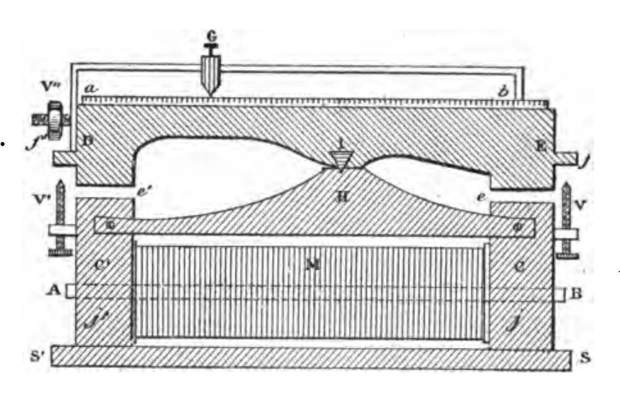


Fig. 19. — Détails de la balance magnétique du Bois.

L'échelle des indications peut être étendue en ajoutant au poids G des rondelles tarées, visibles en bas de la figure 13, à côté de la cale de réglage.

Les échantillons sont cylindriques ou prismatiques. Dans les

deux cas, leur section doit être de 49 mm² (diamètre du cylindre, 7,9 mm; côté du carré, 7 mm).

Pour corriger les erreurs dues à l'hystérésis des blocs CC′ et du fléau DE, on porte les abscisses, dans le tracé des résultats, à partir d'une courbe située au-dessus de l'axe des x.

Cette courbe, dressée pour chaque instrument, est fournie par le constructeur.

Dans cette balance, dont la longueur est d'environ 50 cm, des boutons placés à proximité des couteaux permettent d'immobiliser le fléau pendant le transport. Les blocs sont indépendants du support du fléau et peuvent recevoir un petit déplacement au moyen de vis.

Ce déplacement a pour objet de les amener exactement à l'aplomb des épanouissements du fléau et d'éviter ainsi des efforts autres que ceux dirigés suivant la verticale. Un jeu de clés de serrage et des cônes pour barres cylindriques ou prismatiques accompagnent l'instrument qui fournit des résultats remarquablement comparables.

On ne peut estimer l'hystérésis des échantillons à cause de la masse de fer qui constitue la balance.

Balance magnétique Fischer-Hinnen. — Comme la balance de Du Bois, cet instrument est fondé sur la méthode d'arrachement. Si F est l'effort d'arrachement, exprimé en kilogrammes, et S la section de l'éprouvette, exprimée en centimètres carrés, on a pour valeur de l'induction $\mathcal{B}$, au moment de l'arrachement :

$$\mathcal{B} = 5000 \sqrt{\frac{F}{S}} \text{ gauss.}$$

Dans le but de pouvoir prélever les éprouvettes dans les masses elles-mêmes, au lieu de les couler à part avec le même métal, M. Fischer-Hinnen leur donne la forme d'un cylindre de 80 mm de hauteur et de 25,3 mm de diamètre ($S = 500$ mm²). Les bases du cylindre sont parfaitement dressées et polies.

Comme le montre la figure 20, la balance magnétique de M. Fischer-Hinnen est une véritable balance romaine.

Elle se compose d'un socle en fonte *c* disposé horizontalement et supportant deux couteaux en acier. La partie *f* du socle est dressée et polie; elle reçoit la bobine magnétisante *l* qui entoure l'éprouvette *a*. Sur les couteaux repose, par l'intermédiaire des chapes *d* en acier trempé, une masse de fonte *b* formant le petit bras de la romaine, l'autre bras étant constitué par une tige

horizontale graduée k, le long de laquelle peut se déplacer un contrepoids.

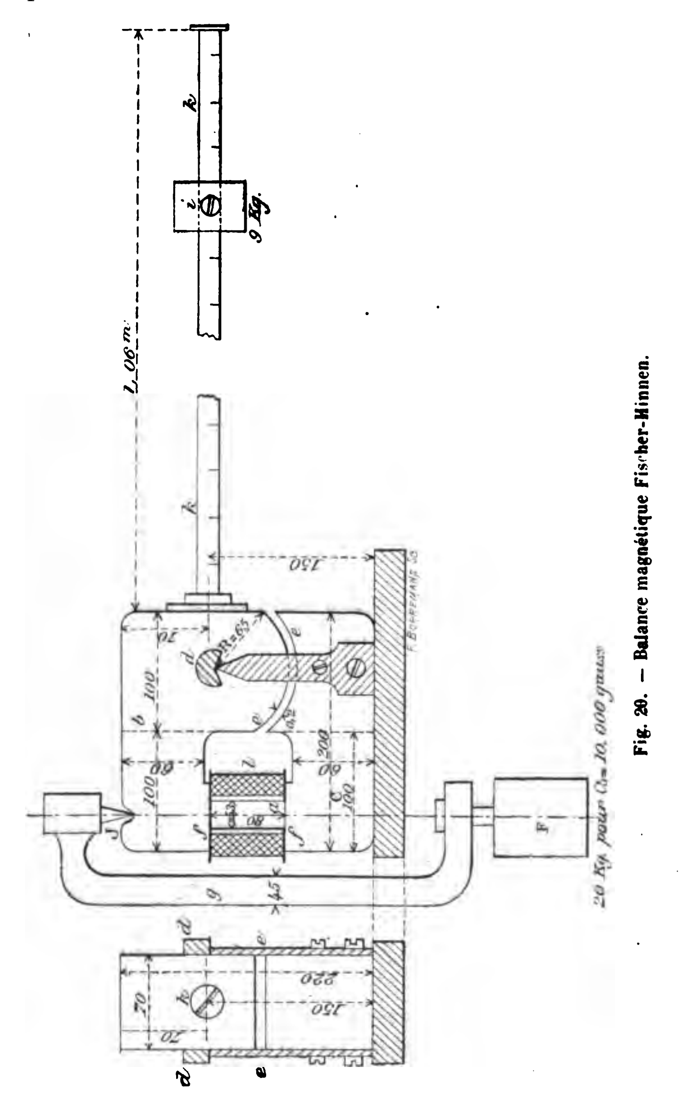


Fig. 29. — Balance magnétique Fischer-Hinnen.

La face f de la pièce b repose sur l'éprouvette a et, pour cette raison, elle est dressée et polie.

Les pièces b, c laissent entre elles un entrefer e dont l'épaisseur uniforme est de 0,2 mm.

Afin que cet entrefer reste invariable et indépendant de l'incli-

naison du fléau; les surfaces polaires en *e* sont cylindriques et ont comme axe la ligne que déterminent les arêtes des couteaux.

Sur la pièce *b* repose, par l'intermédiaire d'un couteau J, une masse F, fixée à un arc métallique *g*, disposé de manière que le centre de gravité de cet organe, qui remplace le plateau de la balance, se trouve sur la verticale passant par l'arête du couteau J.

La masse F contrebalance l'effet du curseur mobile *i* et sert à régler l'équilibre du système.

Pour tarer l'instrument, on détermine d'abord le point zéro en déplaçant le curseur *i* jusqu'à ce qu'on obtienne l'équilibre de la balance, préalablement placée horizontalement sur de solides supports et aucun poids n'étant placé en F. On suspend ensuite à l'arc *g* des masses F dont les poids seront indiqués plus loin.

Pour chaque masse F, on déplace le curseur *i* et, quand l'équilibre est atteint, on marque sur le levier une division correspondant à la position du curseur.

Pendant toutes ces opérations, l'éprouvette est en place, mais la bobine n'est pas excitée.

Les divisions successives tracées sur le levier portent les nombres inscrits dans le tableau ci-dessous, nombres qui représentent les valeurs de $\mathcal{B}$ en fonction des poids F correspondants.

Pour effectuer un essai, on opère de la manière suivante : Soit 10 000 l'induction à laquelle on veut soumettre l'éprouvette. On amène le curseur *i* devant la division 10 000 du levier; cette division, comme on le voit sur le tableau, a été tracée en suspendant à l'arc *g* un poids F de 20 kg.

On excite la bobine avec un courant dont l'intensité, réglée au moyen d'un rhéostat, est suffisante pour maintenir le fléau horizontal après qu'on a enlevé le poids F, l'arc *g* restant en place.

On diminue alors progressivement l'intensité du courant, jusqu'à ce que le fléau *b* se soulève en abandonnant l'éprouvette.

Il suffit alors de noter l'intensité du courant à ce moment; elle permet de calculer la force magnétisante $\mathcal{H}$ déterminant dans l'éprouvette une induction de 10 000 gauss.

On peut ainsi déterminer la perméabilité μ correspondante.

Il est commode de graduer l'ampèremètre en gauss, ce qu'il est facile d'obtenir, connaissant le nombre de spires par centimètre de la bobine magnétisante *l* et l'intensité du courant.

Pour les inductions élevées, il est inutile de corriger les valeurs fournies par l'instrument.

Lorsque les inductions sont inférieures à 10 000 gauss, il faut

Le noyau de droite porte un enroulement S monté en série avec des bobines d'épreuve S_1 S_2 respectivement disposées sur les culasses B_1 B_2.

Le circuit des bobines S S_1 S_2 est relié à un galvanomètre balistique et la bobine S est montée en opposition avec S_1 et S_2 de manière à développer une force électromotrice de sens inverse à celles qui sont produites en S_1 et S_2, lorsqu'on fait varier le flux dans les culasses et dans le transformateur.

Pour repérer le flux Φ, on tourne le commutateur I_1 I_2 au moyen d'une manivelle. Le courant magnétisant est interrompu, puis rétabli à chaque tour par le tambour I_1. Le tambour I_2 constitue un inverseur et donne, dans le galvanomètre balistique G, un sens constant au courant induit résultant développé dans les bobines S S_1 et S_2.



Fig. 14. — Galvanomètre balistique Carpentier.

En faisant varier l'entrefer du transformateur, on modifie son coefficient d'induction mutuelle et on peut annuler le courant induit résultant. Le galvanomètre G reste donc au zéro lorsqu'on tourne la manivelle et que le transformateur a son entrefer réglé. Le flux Φ est ainsi *repéré* mais non *mesuré*. On a soin de ne plus toucher au transformateur T et de ne plus agir sur le rhéostat R afin de conserver la même valeur au courant magnétisant en B_1 et B_2.

Pour effectuer la seconde expérience, on ferme l'interrupteur i_3 afin d'exciter la bobine magnétisante placée sur l'échantillon b; on manœuvre l'inverseur i_1, pour renverser le courant inducteur dans la bobine placée sur B_1; puis, tournant la manivelle, on règle le rhéostat R_2 jusqu'à ce que le galvanomètre se maintienne au zéro.

Le flux est donc le même que dans le premier essai.

Il reste à le mesurer. A cet effet, on utilise la bobine d'épreuve

électro-aimant soigneusement raboté et poli. La bobine magnétisante est excitée par un courant constant et déterminé qui développe dans l'éprouvette une force magnétisante de 20 gauss environ. Les pièces polaires de cet électro-aimant ont des formes spéciales : dans celle de gauche est fraisée une entaille en forme de V; celle de droite est arrondie très exactement de façon à réaliser une partie cylindrique dont les génératrices soient perpendiculaires à celles du barreau qui repose ainsi, d'une part, dans l'entaille en V et, de l'autre, sur cette partie arrondie. Dans ces conditions, les contacts du barreau et de l'électro-aimant se réduisent, d'un côté, à un point parfaitement défini et, de l'autre, à deux portions de génératrices dans le fond du V; cette disposition du barreau sur les pièces polaires a été appelée *loquet magnétique* par M. Ewing.

Le fléau de la balance romaine, servant à mesurer l'effort d'arrachement entre les parties cylindriques perpendiculaires en contact, se compose d'un levier en laiton muni, vers la gauche, de pointes en acier servant d'axe et reposant dans des trous coniques percés sur la pièce polaire de droite de l'électro-aimant. Le petit bras du fléau se termine par une chape dont l'arête vive s'engage sous le barreau pour le soulever près de son point de contact avec la partie arrondie de la pièce polaire de gauche.

Un poids curseur, glissant le long du fléau, permet de faire varier l'effort d'arrachement exercé sur le barreau.

L'instrument est représenté figure 21 où l'on voit vers le bas l'échantillon préparé pour l'essai. Sur le socle de la balance, on voit à gauche l'électro-aimant dont la pièce polaire de droite sert de support à l'axe du fléau. Vers le milieu du socle se trouve un disque en bois dans la gorge duquel est logé un rhéostat en boudin. En faisant tourner le disque dans un sens ou dans l'autre, le ressort de contact que l'on aperçoit en arrière intercale dans le circuit un plus ou moins grand nombre de spires du rhéostat de façon à faire varier l'intensité du courant que le commutateur, placé vers la droite, permet de couper ou d'inverser. Le courant est amené par les bornes, visibles à droite derrière le fléau; ce dernier, lorsqu'il bascule, vient buter sur un bloc qui limite sa course et amortit le choc.

Pour effectuer un essai, on place le barreau entre les pôles de l'électro-aimant en le faisant reposer, par une extrémité, dans le V entaillé sur une des pièces polaires et, par l'autre, sur la partie arrondie de la pièce polaire de gauche. Le contre-poids étant amené vers l'extrémité de gauche du fléau, on inverse deux ou trois fois le courant en empêchant le fléau de basculer;

on évite ainsi les perturbations dues à l'hystérésis et aux aimantations antérieures qu'aurait pu subir le barreau. Laissant alors le courant constant, on amène lentement le curseur vers la droite jusqu'à ce que, l'arrachement se produisant, le fléau bascule.

Pour obtenir un résultat plus précis, on recommence à plusieurs reprises l'opération en ayant soin d'inverser chaque fois le courant et on fait la moyenne des indications données par le curseur au moment de l'arrachement. On opère d'abord avec le barreau étalon, puis avec le barreau du métal à essayer qui doit avoir exactement les mêmes dimensions.

Le fléau est divisé en parties égales et la position du curseur

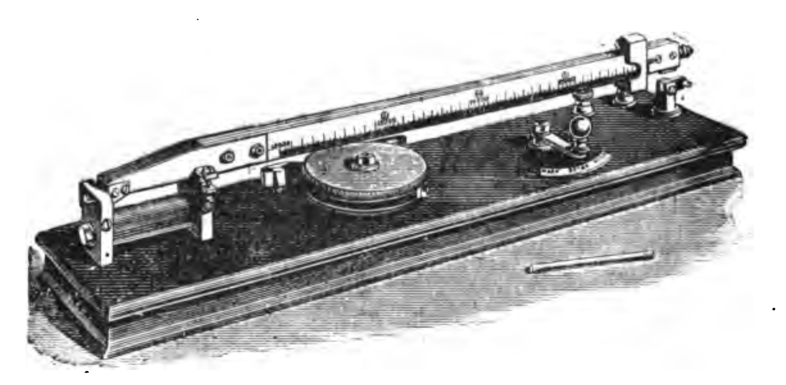


Fig. 21. — Balance d'Ewing.

fait connaître directement les valeurs de l'induction $\mathcal{B}$ dans le barreau, valeurs comprises entre 12 000 et 16 000 gauss.

La force magnétisante $\mathcal{H}$ étant la même dans les deux essais, on obtient ainsi directement le rapport des inductions qu'elle développe dans le barreau étalon et dans le barreau à essayer, la perméabilité μ de ce dernier barreau, pour l'induction observée, est alors donnée par la relation très simple

$$\mu' = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{B}'}\mu,$$

expression dans laquelle :

$\mathcal{B}$ est l'induction observée dans le barreau étalon au moment de l'arrachement;

μ, la perméabilité correspondante, valeur donnée par le constructeur;

$\mathcal{B}'$, l'induction observée dans le barreau étudié;

μ', la perméabilité que l'on désire déterminer.

Afin de pouvoir réaliser l'obtention de la force magnétisante $\mathcal{H} = 20$ gauss pour laquelle l'instrument est gradué en inductions corpespondantes du barreau étalon, on opère comme il suit :

Lorsque $\mathcal{H} = 20$ gauss, l'induction a pour valeur 16 000 gauss dans le barreau étalon. On amène le curseur sur le chiffre 16 000 gravé sur le fléau et on soulève celui-ci de façon à laisser le barreau reposer sur l'électro-aimant. On règle l'intensité du courant, sans se préoccuper de sa valeur, en agissant sur le rhéostat, de façon à obtenir l'arrachement exact lorsqu'on libère le fléau qui doit rester horizontal pour une valeur de l'intensité très peu inférieure à celle qui provoque son mouvement de bascule. A chaque tentative d'arrachement, le curseur étant toujours à la même place, on inverse une ou deux fois le courant. La valeur de l'intensité est alors telle que $\mathcal{H} = 20$ gauss dans le barreau au moment de l'arrachement. Comme on le voit, il n'est pas nécessaire d'avoir un ampèremètre; il suffit que l'intensité du courant reste constante pendant l'essai ultérieur du barreau à essayer.

Le mode opératoire est donc très simple et fort rapide; les résultats obtenus sont d'ailleurs suffisamment exacts et parfaitement comparables.

M. Ewing a adopté la valeur $\mathcal{H} = 20$ gauss parce que, pour des forces magnétisantes plus faibles, il arrive que les courbes de $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$ se rencontrent, même pour des échantillons de perméabilité très différente. Il y aurait donc incertitude complète et appréciation erronée, les échantillons ayant même perméabilité aux faibles inductions et des perméabilités différentes pour les valeurs plus élevées de $\mathcal{H}$. Lorsqu'un échantillon est reconnu bon avec $\mathcal{H} = 20$, il reste tel pour des valeurs plus élevées de $\mathcal{H}$; de même, si l'échantillon est assez bon ou médiocre pour $\mathcal{H} = 20$, il l'est également pour $\mathcal{H} > 20$.

La balance d'Ewing ne permet de déterminer que le point le plus intéressant de la courbe $\mu\ \mathcal{H} = \mathcal{B}$, c'est-à-dire celui qui correspond à $\mathcal{H} = 20$ gauss. Si l'on tenait à connaître une autre valeur de μ correspondant à des inductions différentes, il suffirait d'employer la table suivante dressée pour des valeurs de $\mathcal{H}$ comprises entre 20 et 50 gauss; cette table est le résumé d'un très grand nombre de mesures.

TABLE DES VALEURS APPROXIMATIVES DE $\mathcal{B}$ POUR DIVERSES VALEURS DE $\mathcal{H}$.

$\mathcal{H}$ en gauss	$\mathcal{B}$ en gauss				
	1	2	3	4	5
20	12 000	13 000	14 000	15 000	16 000
25	12 700	13 700	14 600	15 500	16 350
30	13 300	14 200	15 100	15 900	16 600
40	14 200	15 000	15 700	16 400	17 000
50	14 900	15 600	16 300	16 900	17 400

La première ligne horizontale donne la valeur de $\mathcal{B}$ obtenue expérimentalement avec la balance d'Ewing pour $\mathcal{H} = 20$ et pour des échantillons qui ont donné respectivement des inductions de 12 000, 13 000, 14 000, 15 000 et 16 000 gauss. Les autres chiffres font connaître les inductions que l'on obtiendrait dans ces échantillons en augmentant la force magnétisante $\mathcal{H}$; ainsi, par exemple, pour le troisième échantillon, avec $\mathcal{H} = 40$, on trouve dans la table que $\mathcal{B} = 15\,700$ gauss.

Dans le tableau suivant on voit quel est le degré d'exactitude que l'on peut obtenir avec la méthode si simple d'Ewing. Les chiffres de la première colonne font connaître les valeurs de $\mathcal{B}$ obtenues, pour $\mathcal{H} = 20$ gauss, dans 10 échantillons mesurés par la méthode balistique; la deuxième colonne donne les valeurs correspondantes trouvées avec la balance d'Ewing. On peut voir que la concordance des résultats est largement satisfaisante.

$\mathcal{B}$ (balistique)	$\mathcal{B}$ (balance)	$\mathcal{B}$ (balistique)	$\mathcal{B}$ (balance)
13 300	13 280	14 900	14 960
13 400	13 400	15 100	15 060
14 340	14 360	15 570	15 650
14 350	14 290	15 800	15 720
14 600	14 470	16 000	16 000

Perméamètre Lamb et Walker. — La figure 22 est un dessin schématique de cet instrument.

La culasse en fer G affecte la forme d'un U; la branche de gauche de l'U est traversée à frottement doux par un piston de fer C qu'on peut enfoncer plus ou moins en actionnant la vis D au moyen d'une manivelle H. L'échantillon A, de faible section relativement au piston C, est serré dans la branche de droite de l'U; il se termine par un épanouissement polaire B. Un enroulement magnétisant F entoure l'échantillon; il est monté en série avec la bobine E, enroulée sur une carcasse en bronze. Le même courant traverse les deux bobines et les connexions sont établies de manière que les flux développés en B et en C soient en opposition. En réglant l'entrefer existant entre B et C, on arrive à rendre le flux résultant nul en B, ce que l'on constate à l'aide de la boussole T dont l'aiguille N doit rester immobile. Quand

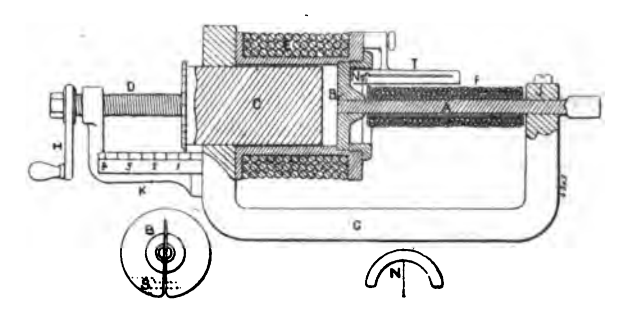


Fig. 22. — Perméamètre Lamb et Walker.

il en est ainsi, les réluctances de l'entrefer en B et du barreau A sont dans le rapport des forces magnétomotrices développées par les enroulements E et F. L'entrefer ayant une perméabilité constante et égale à 1 pour toutes les inductions, il est facile de calculer la perméabilité de l'échantillon en fonction de la longueur d'entrefer. Cette longueur est mesurée par la graduation K. Pour que l'on puisse déterminer la perméabilité de l'échantillon en fonction de l'entrefer, il faut que l'instrument ait été étalonné au moyen d'un barreau type placé en A et étudié autrement, par la méthode balistique par exemple. Une table ou une courbe de graduation doit accompagner l'instrument. Elle fait connaître μ. La mesure de courant fournit la valeur de $\mathcal{H}$ et l'on a les éléments nécessaires au calcul de $\mathcal{B}$.

Quand l'entrefer est convenablement réglé, l'aiguille N reste au repos lorsqu'on inverse brusquement le courant magnétisant.

On admet que les réluctances des divers joints et de la culasse sont négligeables devant celles de l'entrefer en B.

MÉTHODE FONDÉE SUR LA MESURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

On peut mesurer l'intensité d'un champ magnétique par la méthode d'induction, par l'inductomètre ou par la méthode de la spirale de bismuth de Lénard.

La première méthode est principalement employée pour la mesure du champ magnétique dans l'entrefer d'une dynamo ou pour déterminer l'intensité d'aimantation d'un barreau aimanté.

Les perméamètres industriels, utilisant une mesure de champ magnétique sont ceux de Bruger, de Siemens et Halske, de J. Carpentier et de Drysdale.

Mesure du champ magnétique par la méthode d'induction. — Pour appliquer cette méthode, on constitue une bobine *d'exploration* de section *moyenne* s centimètres carrés ayant n spires. On la relie à un galvanomètre balistique de résistance r et on la dispose dans le champ magnétique $\mathcal{H}$ à mesurer en la plaçant perpendiculairement au flux.

On fait tourner cette bobine d'un angle de 180 degrés autour d'un de ses diamètres, pris comme axe de rotation, et l'on observe l'élongation qui résulte de la décharge de la quantité d'électricité induite. Celle-ci a pour valeur

$$Q = \frac{2ns\mathcal{H}\ 10^{-2}}{R}$$

R étant la résistance totale $r + r' + r''$ du circuit de décharge, circuit comprenant, montés en série, le galvanomètre balistique, la bobine d'exploration et, si besoin est pour obtenir une élongation convenable, une résistance additionnelle r''.

On tire de l'expression ci-dessus :

$$\mathcal{H} = \frac{100\,QR}{2ns}$$

$\mathcal{H}$ est exprimé en gauss si Q est exprimé en microcoulombs.

Malgré ces faibles dimensions, la bobine d'exploration ne peut être retournée de 180 degrés lorsqu'elle est disposée dans l'entrefer d'une dynamo. On se contente alors de la retirer brusquement de l'entrefer. L'élongation est alors réduite de moitié, toutes choses égales d'ailleurs et le coefficient 2 disparaît.

Le retournement de la bobine ou son enlèvement doivent être faits brusquement, de manière que la quantité d'électricité

induite soit déchargée dans le balistique avant que l'élongation de celui-ci n'ait commencé.

La surface moyenne de la bobine d'exploration se mesure en partant de ses diamètres intérieur et extérieur.

Pour mesurer l'intensité d'aimantation d'un aimant permanent, on construit une bobine d'exploration capable de glisser facilement le long de l'aimant sur lequel on l'enfile. On la place au milieu de l'aimant, puis on la fait sortir brusquement.

L'élongation du balistique étalonné fait connaître la quantité d'électricité induite $q = k\alpha$.

Si l'aimant est un barreau droit, l'intensité d'aimantation est

$$\mathfrak{J} = \frac{k\,\alpha\,R}{4\pi\,V n}.$$

Expression dans laquelle on a :

k constante du balistique,

α élongation observée,

R résistance totale du circuit de décharge,

V volume en centimètres cubes du barreau,

n nombre de spires de la bobine d'exploration.

Inductomètre de Miot. — Cette méthode, imaginée par M. Miot, est fondée sur le principe du galvanomètre à mercure de M. Lippmann.

Un conducteur, traversé par un courant et placé dans un champ magnétique, est soumis à une force normale au plan défini par le conducteur et la direction du champ.

La mesure de la force ainsi exercée s'effectue par une lecture manométrique, le conducteur étant constitué par du mercure contenu dans un tube capillaire.

Dans le galvanomètre de M. Lippmann, le tube est disposé entre les branches d'un aimant ; le manomètre est étalonné en ampères d'une façon empirique.

Dans l'inductomètre de M. Miot, le tube capillaire est formé d'une chambre très plate, creusée dans une lame d'ébonite. On fait passer un courant constant à travers le mercure et on dispose la chambre plate normalement au champ à mesurer.

Le manomètre, gradué expérimentalement en gauss, est réuni à la chambre mercurielle par des tubes de caoutchouc.

La graduation est déterminée une fois pour toutes et il suffit de mesurer l'intensité du courant constant employé pendant les mesures. La pression manométrique est proportionnelle à une constante et aux intensités du champ et du courant.

Méthode de la spirale de bismuth de Lénard. — Cette méthode, imaginée par Lénard, est fondée sur la propriété que possède un fil de bismuth d'avoir une résistance électrique augmentant, toutes choses égales d'ailleurs, avec l'intensité du champ magnétique dans lequel il est placé.

Sauf pour les champs magnétiques de faible intensité, la variation relative de résistance du fil de bismuth est sensiblement proportionnelle à la valeur du champ qui agit sur lui.

Le fil employé pour la mesure des intensités de champ doit être en bismuth chimiquement pur; il est isolé à la soie et contourné en une double spirale plate dans le but d'annuler les effets de self-induction.

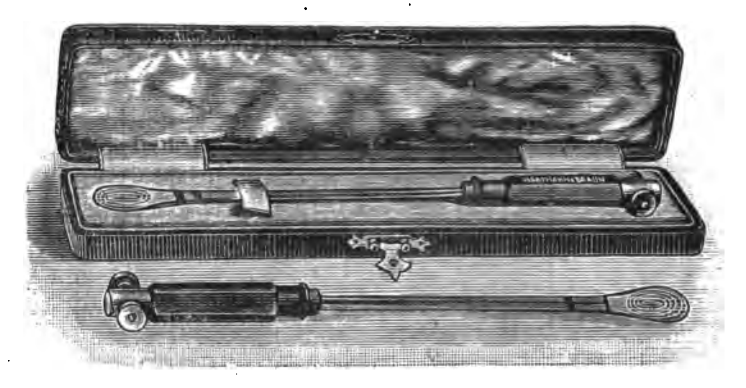


Fig 23. — Spirale de bismuth de Lénard.

Les extrémités du fil, qui n'a que 0,1 mm de diamètre, sont soudées à deux tiges plates en cuivre, isolées l'une de l'autre et terminées par des bornes (fig. 23). Sur chacune des deux faces de la spirale et afin de la protéger contre tout accident, on colle un petit disque de mica.

La spirale a environ 20 mm de diamètre et son épaisseur totale ne dépasse pas 1 mm, afin de pouvoir l'engager facilement dans l'entrefer très étroit d'un circuit magnétique. La longueur de l'appareil complet est de 25 cm.

Pour chaque variation de l'intensité du champ correspondant à 1000 gauss, la spirale de bismuth subit une variation relative de résistance d'environ 5 0/0.

Les bornes de la spirale sont reliées à un pont à fil divisé qui permet, à chaque instant, de mesurer sa variation relative de résistance.

On introduit la spirale dans le champ magnétique à étudier

en ayant soin de la placer de manière que son plan soit perpendiculaire à la direction du flux. Quand on ne connaît pas cette direction, on cherche la position de la spirale pour laquelle la résistance est maximum.

Comme la résistance du bismuth augmente avec la température, il est nécessaire de n'utiliser que des courants de faible intensité pour effectuer la mesure de la résistance à l'aide du pont à fil divisé et de ne fermer le circuit de ce dernier que pendant le temps strictement nécessaire pour faire la lecture au galvanomètre.

On détermine successivement la résistance R_1 de la spirale à

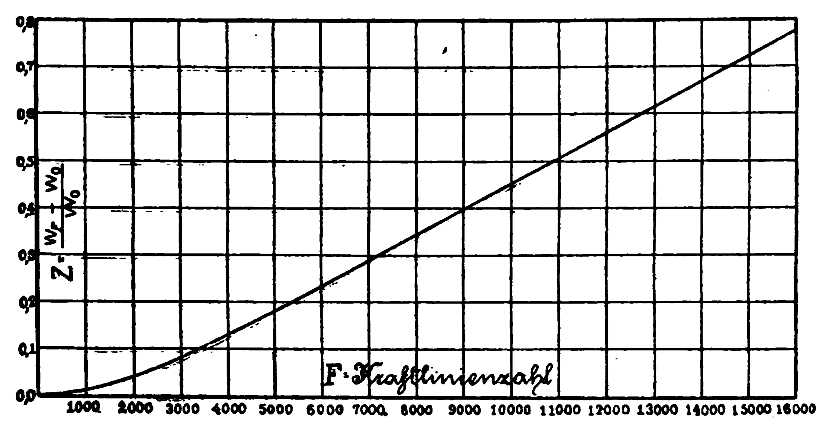


Fig. 24. — Courbe des intensités de champ en fonction de la variation de résistance relative de la spirale de bismuth.

la température ordinaire et sa résistance R_2 à la même température, lorsqu'elle est placée dans le champ magnétique à étudier.

La variation relative de résistance est donnée par l'expression :

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1}$$

qui permet de déterminer la valeur de l'intensité du champ magnétique au point où se trouvait placée la spirale.

A cet effet, on utilise la courbe d'étalonnage livrée avec chaque spirale (fig. 24), courbe sur laquelle les valeurs de l'intensité du champ sont portées en abscisses et les rapports $\frac{R_2 - R_1}{R_1}$ en ordonnées. On voit, par exemple, que si le rapport

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = 0,4$$

le champ dans lequel était placée la spirale avait une intensité de 9000 gauss.

En examinant cette courbe, qui est hyperbolique, on constate qu'au dessus de la valeur 6000 gauss, la résistance de la spirale augmente presque proportionnellement à l'intensité du champ. La courbe est une droite à partir de ce point.

La résistance de la spirale de bismuth est d'environ 20 ohms à la température ordinaire. Il est utile de mesurer cette résistance avant et après chaque opération, afin de s'assurer qu'elle n'a pas augmenté par suite d'échauffement.

Pour mesurer les variations de résistance, on utilise le pont à fil divisé représenté schématiquement par la figure 25.

Il se compose de deux fils calibrés, le long desquels peuvent se déplacer des curseurs S_1, S_2, S_3 mobiles devant des règles divisées.

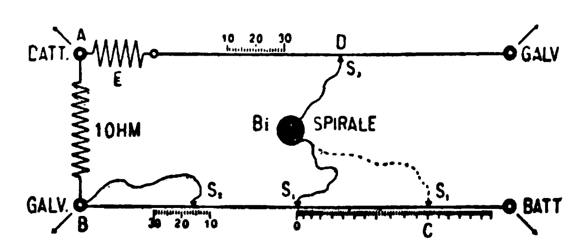


Fig. 25. — Schéma des connexions du pont double employé pour mesurer la variation de résistance de la spirale de bismuth.

En E est une résistance exactement égale à celle de la spirale de bismuth, cette résistance étant celle qui correspond à la température la plus basse à laquelle on se servira de la spirale.

Entre A et B se trouve une bobine de 1 ohm.

La pile se branche entre les points marqués « Batt », le galvanomètre entre ceux marqués « Galv » et la spirale entre les curseurs S_1, S_3.

La spirale de bismuth étant hors de tout champ magnétique, on met le curseur S_1 au zéro de son échelle et le curseur S_2 devant le chiffre qui correspond à la température de la spirale. Les divisions de la règle relative au curseur S_2 sont tracées en rouge.

On déplace le curseur S_3 jusqu'à ce que le galvanomètre se maintienne au zéro lorsqu'on ferme le circuit.

Les curseurs S_2, S_3 restant à leur place, on place la spirale dans le champ dont on mesure l'intensité et on constate que, pour ramener le galvanomètre au zéro, il faut déplacer le curseur S_1 jusqu'en C, par exemple.

La distance OC exprime la *variation relative* de la résistance de la spirale. Il reste à reporter cette valeur sur la courbe (fig. 24),

pour que l'abscisse du point correspondant fasse connaître l'intensité du champ dans lequel était placée la spirale.

Perméamètre Bruger. — Cet instrument, construit par MM. Hartmann et Braun, permet d'effectuer les mesures de perméabilité par la méthode qui vient d'être décrite.

Il se compose d'un cadre en fer de grande section dont les côtés les plus longs sont légèrement cintrés (fig. 26). Ce cadre, qui rappelle beaucoup celui de l'instrument d'Hopkinson, est muni de deux trous à travers lesquels on passe à frottement

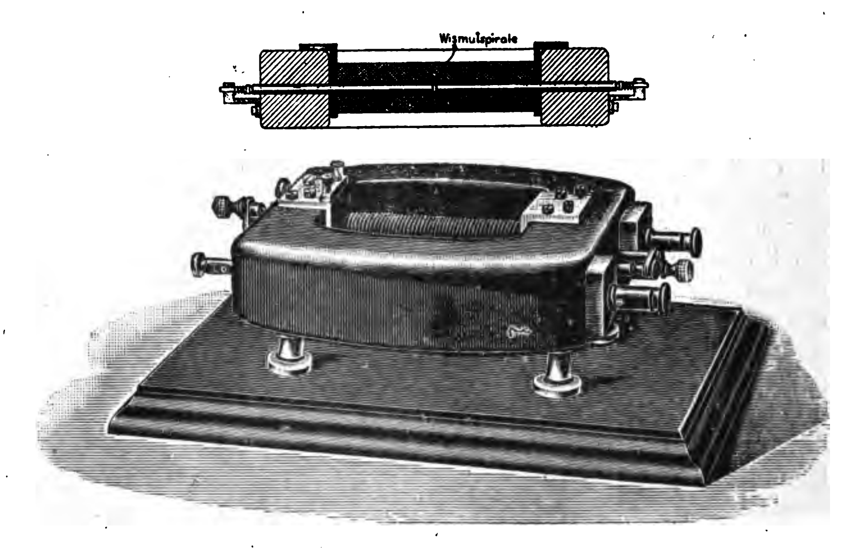


Fig. 26. — Perméamètre Bruger.

doux l'échantillon à essayer. Ce dernier, comme on peut le voir en haut de la figure sur la coupe du cadre, est en deux morceaux séparés par la bobine en fil de bismuth.

Afin que la distance des deux parties de l'échantillon soit toujours la même, la bobine de bismuth est protégée par des disques en laiton et des ressorts en boudin font appuyer les morceaux de l'échantillon contre ces disques.

Une bobine magnétisante entoure le barreau ainsi que la spirale. Quand on excite cette bobine, la résistance du bismuth varie et on mesure cette variation comme il a été dit ci-dessus.

Connaissant l'intensité du courant d'excitation, le nombre de spires de la bobine magnétisante et la variation relative de résistance de la spirale, il est facile d'obtenir les valeurs de $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$.

La figure 27 montre l'aspect d'ensemble de l'instrument complet.

Le cadre en fer est placé au milieu d'une planchette de 1,10 m de long.

En avant et en arrière, sur cette planchette, se trouvent les fils calibrés du pont; S_1, S_2, S_3 sont les trois curseurs.

A droite, on aperçoit le galvanomètre apériodique et la clé T à deux contacts successifs servant aux mesures de résistance.

A gauche, on remarque l'ampèremètre indiquant l'intensité du courant magnétisant, courant qu'on peut interrompre en S.

Ce courant, fourni par quelques accumulateurs, arrive aux bornes K, la pile du pont étant reliée aux bornes *k*. Les indications fournies par cet instrument sont assez exactes et la manipulation en est très simple.

Fig. 27. — Instrument complet pour la détermination des qualités magnétiques du fer.

Il y a lieu de noter que les essais doivent être cependant exécutés rapidement, afin d'éviter tout échauffement de la bobine de bismuth dont la température serait alors inconnue. Si ce fait se produisait pendant les expériences, les résultats seraient naturellement erronés, puisque la variation relative de la résistance ne serait plus exclusivement due à l'action du flux sur le bismuth.

La longueur de la bobine magnétisante, mesurée entre les

faces internes du cadre, est exactement de 12,56 cm $= 4\pi$ cm. Le diamètre du barreau à essayer est de 1 cm; les faces en contact avec la spirale de bismuth doivent être soigneusement dressées.

Perméamètre Siemens et Halske. — Cet instrument (fig. 28), construit par la Société Siemens et Halske, de Berlin, est fondé sur le principe déjà indiqué en 1886 par M. Marcel Deprez qui l'a appliqué à la construction d'un perméamètre. Le docteur Hubert Kath, en Allemagne, a également employé le même principe qui consiste, comme on l'a dit, à renverser la destination du galvanomètre Deprez d'Arsonval : au lieu de mesurer l'intensité d'un courant circulant dans le cadre mobile de l'instrument par la déviation que subit ce dernier, placé dans un champ magné-

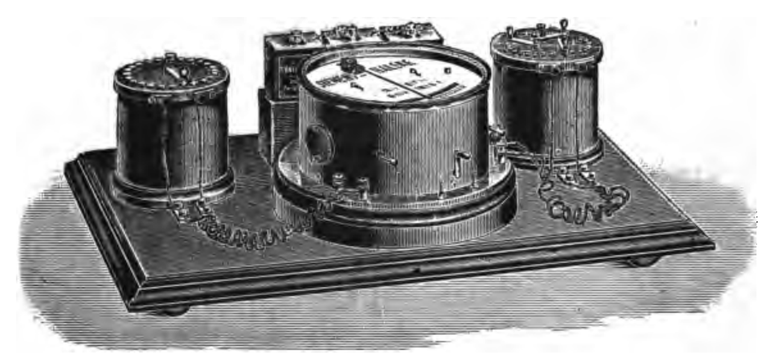


Fig. 28. — Perméamètre Siemens et Halske.

tique constant, on mesure la valeur du champ par la déviation que subit le cadre mobile sous l'action d'un courant constant.

Comme le montre la figure schématique 29, le perméamètre du docteur Hubert Kath se compose essentiellement d'un galvanomètre à cadre mobile dont l'aimant permanent est remplacé par un circuit magnétique excité par une bobine M.

L'échantillon, qui a la forme d'un barreau cylindrique AB, pénètre dans les trous percés à travers deux gros blocs de fer C, D. Ces blocs viennent entourer en partie le cadre mobile M et la réluctance de l'entrefer est diminuée par la présence du noyau de fer E.

Le barreau, bien ajusté, entre à frottement doux dans les ouvertures des blocs et des vis de pression p, p' le maintiennent en place.

On fait passer dans le cadre mobile et par les ressorts spiraux antagonistes un courant d'intensité constante fourni par une pile

S de trois éléments à liquide immobilisé, courant qu'un milliampèremètre I permet de mesurer.

Cela fait, si on excite la bobine M, le cadre est dévié proportionnellement au flux dans l'entrefer, c'est-à-dire au flux développé dans le barreau.

Pour éliminer l'effet dû au flux propre des blocs C, D, ceux-ci sont recouverts de bobines M′, M″, montées en série avec la bobine M et qui sont reliées de manière à diminuer le flux total exactement d'une quantité égale au flux dû aux blocs eux-mêmes.

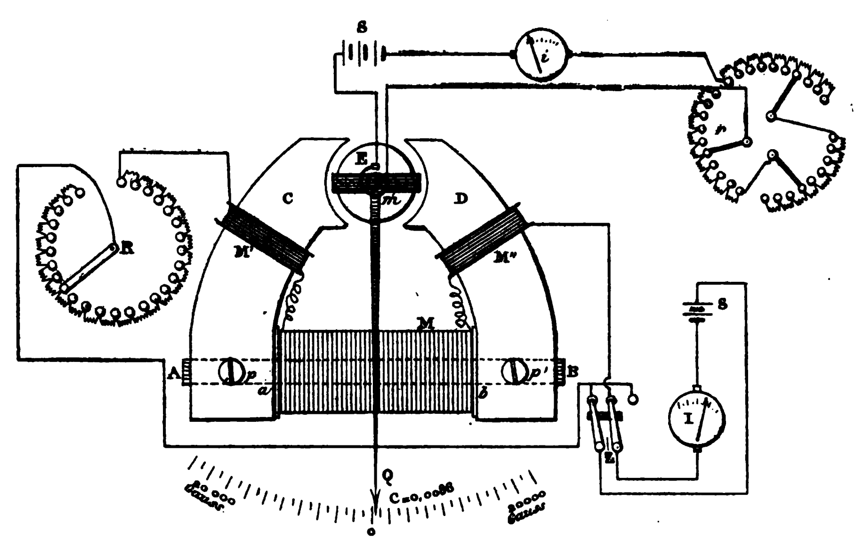


Fig. 29. — Schéma des connexions du perméamètre Siemens et Halske.

Quand les bobines M, M′, M″ sont excitées et que le barreau AB est enlevé, le cadre *m*, bien qu'étant traversé par un courant, ne doit pas dévier. Cette constatation indique que les bobines compensatrices M′, M″ produisent exactement leur effet.

Un rhéostat *r* à trois manettes permet de régler avec précision l'intensité du courant dans le cadre.

Les manettes du rhéostat *r*, visibles à droite de la figure 29, agissent respectivement sur des centaines, dizaines et unités de résistance; le réglage de l'intensité du courant dans le cadre peut donc être très précis.

A gauche de la figure, on aperçoit un autre rhéostat R servant à régler l'intensité du courant magnétisant fourni par quelques accumulateurs S. Un inverseur Z, placé dans le circuit des bobines M, M′, M″, permet d'éliminer les effets dus à l'hystérésis.

Pour connaître l'intensité i qu'il faut donner au courant qui traverse le cadre mobile m, on divise un coefficient (gravé sur le cadran du perméamètre) par la section du barreau essayé.

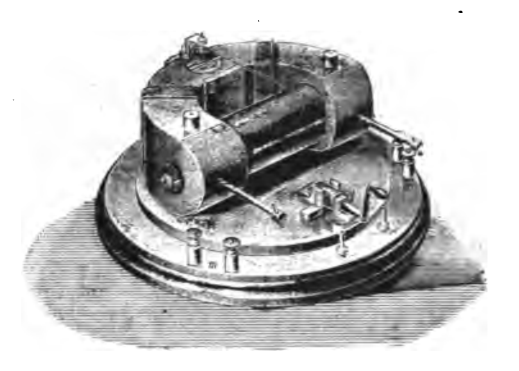


Fig. 30. — Intérieur du perméamètre Siemens et Halske.

Le coefficient est variable d'un instrument à l'autre, mais il est toujours assez voisin de 0,0086. Si la section du barreau est de 1 cm², par exemple, l'intensité i devra être de 0,0086 ampère.

Afin d'éviter tout calcul dans la détermination de la force magnétisante, la longueur active ab du barreau est exactement de 12,56 cm $= 4\pi$cm. D'autre part, la bobine M a 1000 spires, de telle sorte que la force magnétisante $\mathcal{H}$ vaut 100 fois l'intensité en ampères du courant I circulant dans les bobines M, M′, M″.

La résistance totale des bobines M, M′, M″ est de 2,66 ohms; lorsque le rhéostat R est hors circuit, on obtient avec deux éléments d'accumulateurs une force magnétisante de 150 gauss, en comptant 2 volts par élément.

$$\mathcal{H} = 100 \cdot \frac{4}{2,66} = 150 \text{ gauss.}$$

Cette valeur est bien assez grande pour l'étude des matériaux ayant une perméabilité élevée. Avec 4 éléments, la force magnétisante est doublée et permet d'effectuer des mesures sur des aciers durs à aimants, la force magnétisante pouvant atteindre alors 300 gauss.

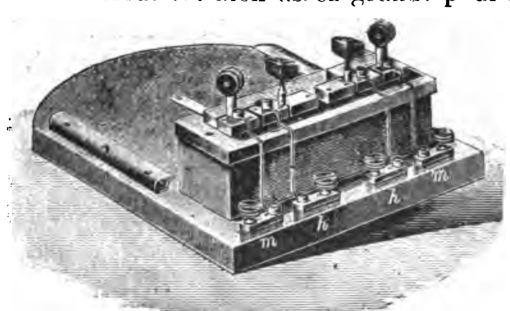


Fig. 31. — Combinateur à fiches du perméamètre Siemens et Halske.

La graduation du perméamètre permet de lire directement les inductions comprises entre + et — $\mathcal{B} = 20\,000$ gauss.

La figure 30 montre la disposition intérieure du perméamètre qui comporte comme accessoires, montés sur le socle de l'instrument (fig. 28), le rhéostat R à 24 plots intercalé sur le circuit des bobines M, M′, M″, le rhéostat *r* à trois manettes servant à graduer l'intensité du courant qui circule dans le cadre mobile, une pile de trois éléments à liquide immobilisé fournissant ce courant et enfin des bornes destinées à recevoir les connexions.

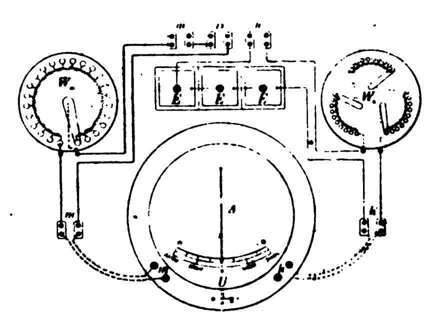


Fig. 32. — Connexions du perméamètre Siemens et Halske.

On utilise, en outre, un combinateur à fiches (fig. 31) qui sert à intercaler dans le circuit magnétisant un ampèremètre convenablement gradué et shunté et un milliampèremètre dans le circuit du cadre mobile. Ce combinateur est fixé sur le bord d'une planchette sur laquelle se place l'ampèremètre.

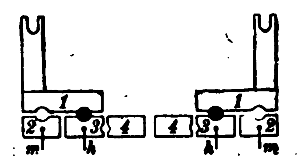


Fig. 33. — Position à donner aux fiches du combinateur pour mesurer l'intensité du courant passant dans le cadre mobile du perméamètre.

Les bornes *m* et *h* de l'instrument se relient aux bornes *m m* et *h h* du combinateur, à l'aide de conducteurs ayant environ 1 mètre de long, afin que le champ magnétique de l'aimant de l'ampèremètre ne puisse troubler les indications fournies par le cadre mobile du perméamètre. La figure 33 montre comment sont établies les connexions qui relient le perméamètre et ses accessoires.

Pour mettre le milliampèremètre dans le circuit du cadre mobile du perméamètre, on place les fiches du combinateur comme l'indique la figure 33; deux fiches seulement sont nécessaires et on les enfonce dans les trous qui séparent les plots 1 et 3 de gauche et de droite.

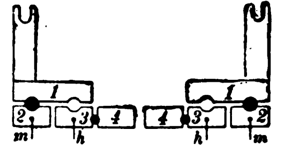


Fig. 34. — Position à donner aux fiches du combinateur pour mesurer l'intensité du courant magnétisant fourni par 2 accumulateurs.

Pour mesurer l'intensité du courant magnétisant à l'aide du même milliampèremètre, on donne aux fiches les positions indiquées sur la figure 34. Dans ces conditions, le courant qui passe dans le cadre mobile du perméamètre

traverse les bornes 3 et 4 de droite, une résistance égale à celle du milliampèremètre, soit 1 ohm, intercalé entre les deux bornes 4 et enfin les bornes 4 et 3 de gauche. Le milliampèremètre est donc disponible pour la mesure du courant magnétisant et il est alors mis en dérivation aux bornes d'une résistance étalonnée intercalée dans le circuit des bobines M, M′, M″. Cette résistance étant égale au 1/9e de celle du milliampèremètre, le dixième du courant seulement traverse ce dernier et ses 150 divisions correspondent alors à 1,5 ampère au lieu de 150 milliampères.

Enfin, lorsqu'on veut étendre la limite des indications de l'instrument, on emploie la disposition qu'indique la figure 35. La résistance qui relie les plots 1 et 2 de droite est alors intercalée en dérivation sur l'ampèremètre; comme cette résistance est égale à celle de l'ampèremètre, la sensibilité de ce dernier est diminuée de moitié et ses 150 divisions correspondent à 3 ampères. Cette troisième disposition est utilisée lorsqu'on emploie 4 éléments d'accumulateurs pour obtenir une force magnétisante de 300 gauss.

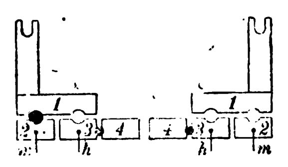


Fig. 35. — Position à donner aux fiches du combinateur pour mesurer l'intensité du courant magnétisant fourni par 4 accumulateurs.

Pour faire un essai, on mesure la section de l'éprouvette du métal expérimenté, de façon à permettre le calcul de l'intensité du courant constant à faire passer dans le cadre mobile.

Avant de mettre l'éprouvette en place dans le perméamètre, on s'assure que l'aiguille ne dévie pas lorsqu'on envoie le courant dans la bobine magnétisante et dans le cadre mobile. L'éprouvette de métal AB (fig. 29) est alors placée à l'intérieur de la bobine M, en ayant soin d'éviter que ses extrémités dépassent les pièces polaires CD; on serre alors les vis de fixage. Cela fait, on règle l'intensité du courant qui passe dans le cadre mobile E, en manœuvrant le rhéostat *r*.

La bobine M est alors excitée par le courant fourni par 2 ou par 4 accumulateurs, suivant les cas. Le rhéostat R est disposé de façon que toutes les résistances soient mises hors circuit, et l'on ferme l'inverseur Z, à gauche, par exemple, du côté marqué O — sur l'instrument, côté auquel correspondent les parties négatives de la courbe de $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$. Pour chaque position de la manette du rhéostat R, on lit la déviation de l'aiguille du perméamètre et les indications fournies par l'ampèremètre intercalé dans le circuit magnétisant. On peut ainsi obtenir 24 points de la courbe entre le maximum négatif et zéro.

Plaçant alors l'inverseur sur la position de droite, marquée 0 +, on détermine de la même manière les 24 points de la partie positive de la courbe, l'intensité du courant magnétisant variant alors depuis zéro jusqu'au maximum positif.

L'induction la plus élevée indiquée par l'instrument correspondant à — ou + 20 000 gauss, on n'a guère l'occasion d'atteindre cette limite dans la pratique, car la partie la plus intéressante de la courbe d'induction est celle qui se trouve un peu au-dessus du coude qu'elle fait.

La perméabilité des tôles minces peut également être déterminée au moyen de cet instrument; il suffit de découper les tôles en leur donnant une largeur de 5 mm, l'épaisseur du paquet que l'on forme étant aussi de 5 mm. La section réelle du fer se détermine pour chaque tôle dont on mesure l'épaisseur moyenne à l'aide d'un palmer.

Les résultats fournis par le perméamètre Hubert Kath sont très suffisamment précis et surtout parfaitement comparables entre eux et avec ceux que l'on obtient par les méthodes longues et délicates employées dans les laboratoires.

D'une façon générale, dans les mesures de perméabilité, l'intensité du courant d'excitation doit être déterminée avec beaucoup d'exactitude, surtout si la bobine magnétisante comporte un grand nombre de spires. La moindre erreur de ce chef peut, en effet, conduire à des résultats tout à fait erronés puisque, dans le calcul de la force magnétisante, entre le produit de l'intensité du courant par le nombre de spires de la bobine excitatrice.

Perméamètre à torsion J. Carpentier. — Cet instrument (fig. 36), fondé sur une mesure de champ magnétique par la méthode de réduction à zéro, permet de déterminer rapidement la courbe $\mathcal{B} = \mu\mathcal{F}$ d'un échantillon de fer.

Celui-ci affecte la forme d'un barreau cylindrique de 150 mm de long sur 11,28 mm de diamètre, soit une section de 1 cm². Ce barreau est disposé suivant le diamètre d'un anneau de fer de grande section et l'on comprendra, par suite, que l'instrument ne peut fournir le tracé exact de la boucle d'hystérésis, à cause de la présence de cet anneau de fer.

Comme le montre la figure 37, qui représente le perméamètre J. Carpentier, en plan et en élévation, l'anneau de fer AA est percé, normalement à son plan, de deux ouvertures DD′ qui le traversent de part en part et qui ont 16 mm sur 16 mm. Ces ouvertures sont disposées suivant un diamètre de l'anneau AA qui est coupé par les sections BB′. En ces points sont placées des

cales en bronze BB′ laissant subsister dans l'anneau deux entrefers de 2 mm d'épaisseur.

Les oreilles et les vis J servent à maintenir assemblées les deux moitiés d'anneau, celui-ci reposant sur trois pieds tels que L. Dans l'ouverture D′ se place un magnétomètre de torsion ; l'entrefer B et l'ouverture D n'ont d'autre objet que de donner la même réluctance aux deux moitiés de l'anneau traversées par les flux $\varphi \varphi'$.

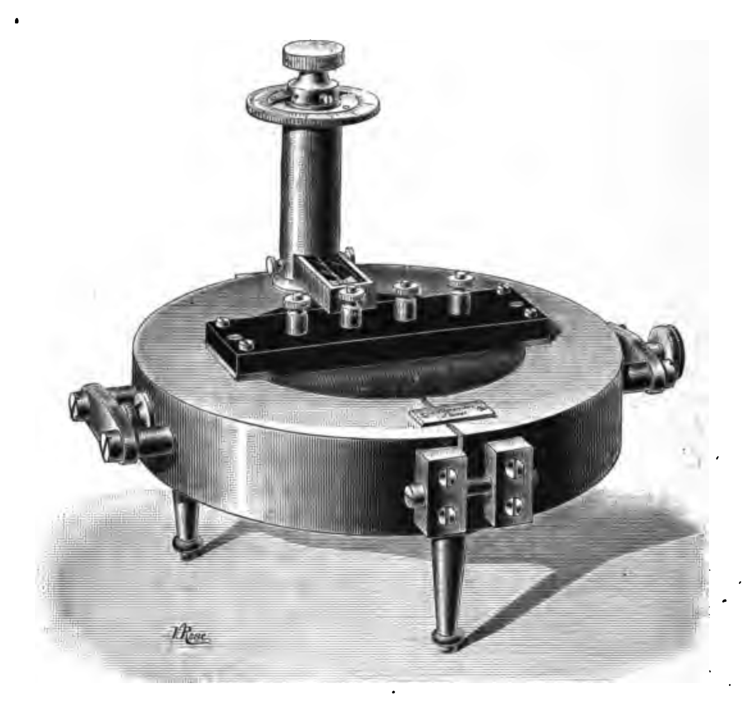


Fig. 36. – Perméamètre à torsion J. Carpentier.

Suivant le diamètre GG′ perpendiculaire à DD′ l'anneau est percé de trous cylindriques de 30 mm de diamètre. Des tampons en fer GG′ passent à frottement doux à travers ces trous ; ils se terminent par des têtes molettées.

Les faces $\alpha \alpha'$ des tampons affleurent l'intérieur de l'anneau A, elles sont parallèles, soigneusement dressées et polies. Le barreau d'épreuve F a ses extrémités travaillées de la même manière ; il n'est maintenu en place que par la pression que les tampons exercent sur lui. Cette pression est donnée par une vis H″ dont est muni un des deux étriers de butée H H′. Les barrettes de butée se démontent aisément de façon à permettre

la mise en place du barreau et des tampons. Le barreau F est entouré d'une bobine magnétisante E comportant deux enroulements ayant chacun 755 spires. Ces enroulements peuvent être groupés à volonté, en quantité ou en série; ils sont disposés sur une carcasse en laiton fendue suivant une génératrice.

Le magnétomètre *h h'* (fig. 38) se compose d'un cadre rigide en laiton *g g'* supportant, au moyen de fils d'argent, un petit aimant *f* en fer à cheval. L'aiguille *i*, disposée dans une boîte *k* fermée par une glace, permet de repérer la position de l'aimant *f* lorsque celui-ci est en place au milieu de l'ouverture D' de l'anneau A. En agissant sur le bouton *d* on tord les fils de suspension et on peut toujours ramener l'aimant dans la position initiale lorsqu'il a dévié sous l'action du flux φ'.

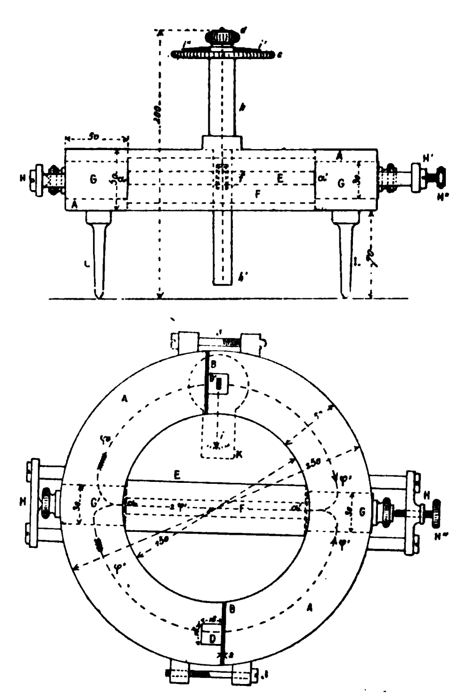


Fig. 37. — Détails de construction du perméamètre à torsion J. Carpentier.

Le bouton *d* porte deux index *i' i''* placés au-dessus du cercle gradué *c*. Ce cercle peut être orienté à volonté; il possède deux graduations. Tout l'ensemble du magnétomètre est soutenu par un tube *h h'* contenant de l'huile jusqu'au niveau *a b*, l'huile servant à amortir les oscillations de l'aimant *f*.

Quand le magnétomètre est en position, le plan de l'aimant *f* est perpendiculaire à l'axe $\alpha \alpha'$ du barreau. Lorsqu'on excite la bobine magnétisante E, l'aimant tend à s'orienter normalement à sa position première. On l'y ramène en tournant le bouton de torsion *d*. L'angle de torsion est proportionnel au flux φ', moitié du flux total, traversant le barreau F.

Le perméamètre est complété par une caisse (fig. 39) contenant un rhéostat divisé en centaines et dizaines d'ohms; un ampèremètre gradué en gauss; un inverseur et les bornes nécessaires;

un shunt permet, au besoin, d'étendre les indications de l'ampèremètre.

On emploie, comme source d'électricité, une batterie de 7 à 8 petits accumulateurs aboutissant aux bornes + et —; la bobine magnétisante du perméamètre est reliée aux deux autres bornes.

La mesure de $\mathcal{F}$ fournie par l'ampèremètre nécessite une correction proportionnelle au flux φ' à cause de la portion de force magnétisante $\mathcal{F}$ nécessaire à l'aimantation de l'anneau A A. Cette correction variable de 0 à 7 est indiquée par l'index i' du bouton de torsion. L'index i'' donne la valeur de l'induction dans le barreau F. Chaque division de la graduation correspond à 200 gauss; on peut mesurer jusqu'à 18 000 gauss.

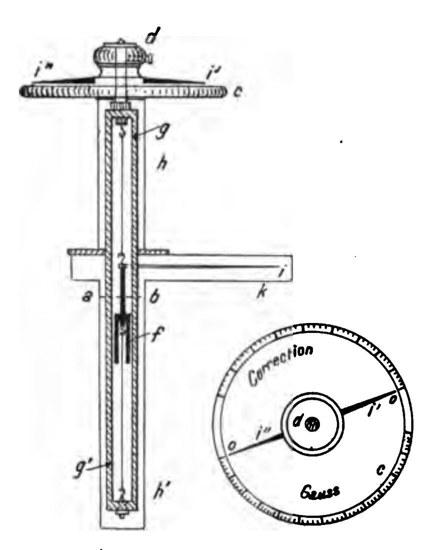


Fig. 32. — Magnétomètre du perméamètre à torsion J. C.rpentier.

Voici comment on procède à un essai :

L'échantillon étant mis en place, on lance le courant dans la bobine E en réglant le rhéostat N de manière que l'ampèremètre F indique sensiblement la force magnétisante choisie.

On manœuvre deux ou trois fois l'inverseur M, à droite et à gauche, puis on le laisse à gauche, par exemple. On tourne le bouton de torsion *d* de manière à amener au zéro l'aiguille *i* de l'aimant *f*, puis on oriente le cercle *c* pour amener les zéros de ses graduations en face des index i' i'',

L'inverseur M est alors poussé brusquement à droite. L'aimant *f* dévie de nouveau; on ramène son aiguille *i* au zéro en tournant le bouton de torsion *d* et on note les valeurs marquées par les index i' i'' sur le cercle gradué *c*.

L'index i'' fournit là valeur de $\mathcal{B}$, l'index i' donne la correction C à faire subir à la lecture $\mathcal{F}$ à l'ampèremètre (gradué en gauss). La perméabilité μ a pour valeur corrigée.

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{F} - C}$$

En faisant varier $\mathcal{F}$ au moyen du rhéostat N, on peut obtenir une série de valeurs de μ et en tracer la courbe en fonction de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{F}$, $\mathcal{F}$ ayant même mesure que $\mathcal{B}$.

Pendant le réglage de l'appareil, lorsqu'on amène pour la première fois l'aiguille i au zéro, il importe de faire tourner légèrement les tampons G G′ sur eux-mêmes et de voir si ce mouvement modifie la position de l'aiguille i.

Si l'échantillon est bien placé, la rotation donnée aux tampons ne doit pas modifier la position de cette aiguille.

Deux goujons, fixés après le magnétomètre, obligent à toujours le replacer convenablement dans l'ouverture D′ de l'anneau A.

Le moment magnétique de l'aimant f varie très peu avec le

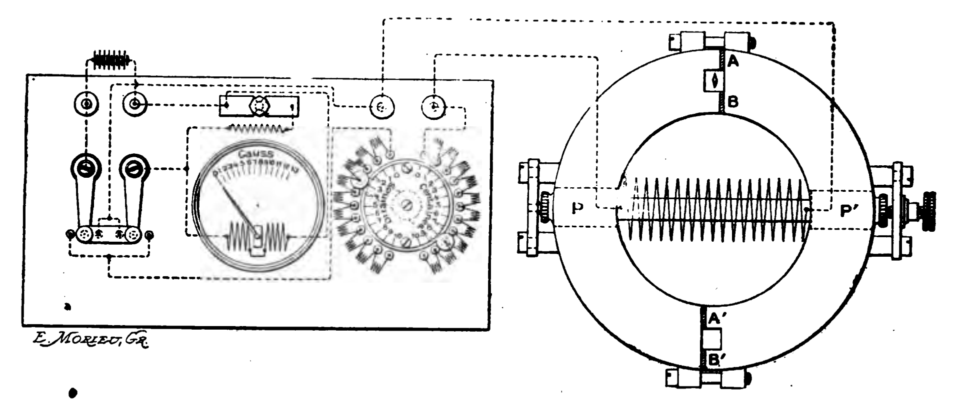


Fig. 39. — Schéma de l'installation du perméamètre à torsion J. Carpentier.

temps; cela tient à ce que des butées limitent sa déviation et l'empêchent de s'orienter suivant la direction du flux φ'.

D'ailleurs, lorsque le constructeur fournit un barreau étalon accompagné de sa courbe de magnétisme, on est à l'abri des erreurs provenant des variations, soit de l'aimant du magnétomètre, soit de l'ampèremètre $\mathcal{F}$, $\mathcal{F}$ ayant même mesure que $\mathcal{B}$.

Il suffit de faire passer l'étalon dans le perméamètre lors de chaque essai à effectuer avec un échantillon à étudier. La courbe de magnétisme de l'étalon et les données expérimentales suffisent pour effectuer les corrections.

Le barreau étalon livré avec le perméamètre de torsion est étudié par le constructeur au moyen de la méthode du joug et à l'aide du galvanomètre balistique; malheureusement il peut varier avec le temps à cause de modifications moléculaires inévitables.

Dans une expérience faite avec un perméamètre de torsion, les lectures à l'ampèremètre $\mathcal{F}$ muni de son shunt *s* devaient être multipliées par 5; les bobines E étaient montées en série.

On a trouvé pour un échantillon :

Lecture à l'ampèremètre $\mathcal{F} = 10$ gauss.

Lecture à l'index $i'' = 15\,600$ gauss.

Lecture à l'index i' (correction) $= 69$ divisions.

On tire de là :

$$\mu = \frac{15\,600}{10{,}5 - 6{,}9} = 361{,}9$$

Perméamètre de Drysdale. — Dans la méthode de Drysdale, on creuse dans les pièces fondues ou forgées, une cavité devant servir à loger une bobine magnétométrique.

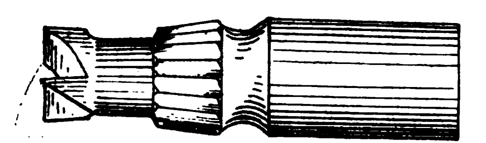


Fig. 40. — Foret spécial.

Le circuit magnétique est fermé et le magnétomètre se trouve ainsi être une sorte d'électro-aimant cuirassé. La bobine comprend deux enroulements, l'un *magnétisant*, l'autre dit *d'épreuve*. Ce dernier étant relié à un galvanomètre balistique. La cavité, creusée par un foret spécial représenté (fig. 40), se compose d'un trou cylindrique d'environ 10 mm de diamètre et de 16 mm

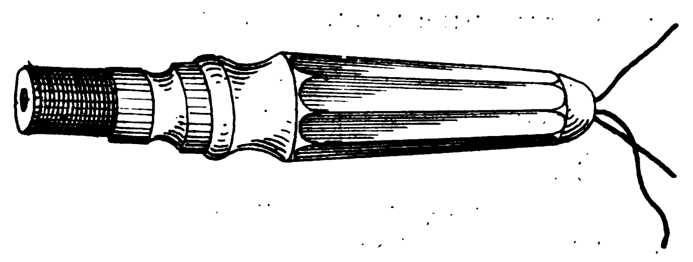


Fig. 41. — Perméamètre à bouchon d'épreuve.

de profondeur. Le foret, évidé suivant son axe, laisse subsister, au centre de la cavité, une fine tige cylindrique de 2,5 mm de diamètre, tige constituant le noyau de l'électro-aimant cuirassé et qui adhère au fond du trou. Une fraise taillée dans la masse du foret lui-même sert à rendre légèrement conique l'entrée de la cavité.

La bobine du magnétomètre est disposée à l'extrémité d'un

manche d'ébène (fig. 41) et se trouve surmontée d'un bouchon en fer obturant exactement l'entrée du trou foré, lorsque l'appareil est mis en place pour les expériences. A cet effet, la forme conique du bouchon de fer est exactement la même que celle que taille la fraise à l'entrée de la cavité. De plus, le bouchon de fer est percé et fendu longitudinalement, de manière à lui donner une certaine flexibilité. On le met en position tout comme une cheville de boîte de résistances. Le noyau réservé dans la cavité pénètre dans l'axe du bouchon de telle manière que la bobine magnétométrique se trouve complètement noyée dans la masse de fer. Il faut de 10 à 15 minutes pour percer le trou. Les dimensions de celui-ci peuvent être moindres, d'ailleurs, que celles indiquées plus haut. Naturellement les divers forets qu'on emploie ont des fraises identiques afin que le même bouchon s'applique à tous les trous. Lorsque l'expérience est terminée, on fait tomber la tige réservée au milieu de la cavité et on rebouche le trou au moyen d'une broche vissée. La figure 42 montre le magnétomètre mis en place dans un trou percé dans la masse même d'une pièce de fer ou d'acier.

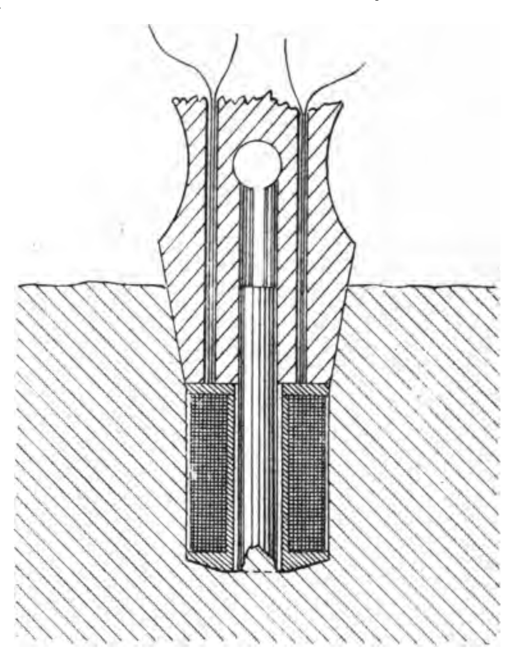


Fig. 42. — Magnétomètre mis en place.

La figure 43 représente schématiquement les connexions à établir entre la bobine du magnétomètre et les instruments de mesure.

Le courant magnétisant, fourni par une batterie B, traverse un rhéostat R, un ampèremètre G, un inverseur RS et la bobine magnétisante MC du magnétomètre.

La bobine d'épreuve SC de ce dernier est reliée à un galvanomètre balistique G_2. En ouvrant, fermant ou inversant le commu-

tateur RS, on obtient au balistique des élongations proportionnelles à l'aimantation développée dans le circuit magnétique de a bobine. CC est une bobine de *compensation* dont on indiquera plus loin le but. En pratique, l'ampèremètre G est directement

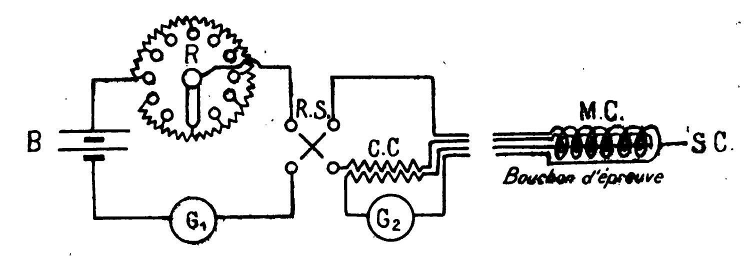


Fig. 43. — Connexions à établir pour effectuer les mesures par la méthode balistique.

gradué en gauss et l'échelle du balistique G_2 en valeurs de $\mathcal{B}$. Le quotient $\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$ donne la valeur μ de la perméabilité, mais, le plus souvent, on se contente de comparer les valeurs de $\mathcal{B}$ obtenues avec celles que fournit un échantillon reconnu comme bon.

Dans la pratique industrielle, il est possible de simplifier encore

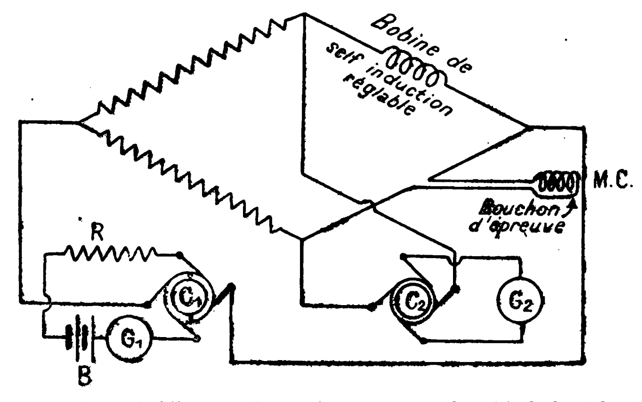


Fig. 44. — Connexions à établir pour effectuer les mesures par la méthode de réduction à zéro.

cette installation. Connaissant la tension de la batterie et la résistance de la bobine magnétisante, on peut supprimer l'ampèremètre G et le rhéostat R. Dans ce cas, on se contente, de déterminer une seule valeur de $\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$ et le balistique est alors gradué directement en valeurs de μ. On peut aussi employer d'autres

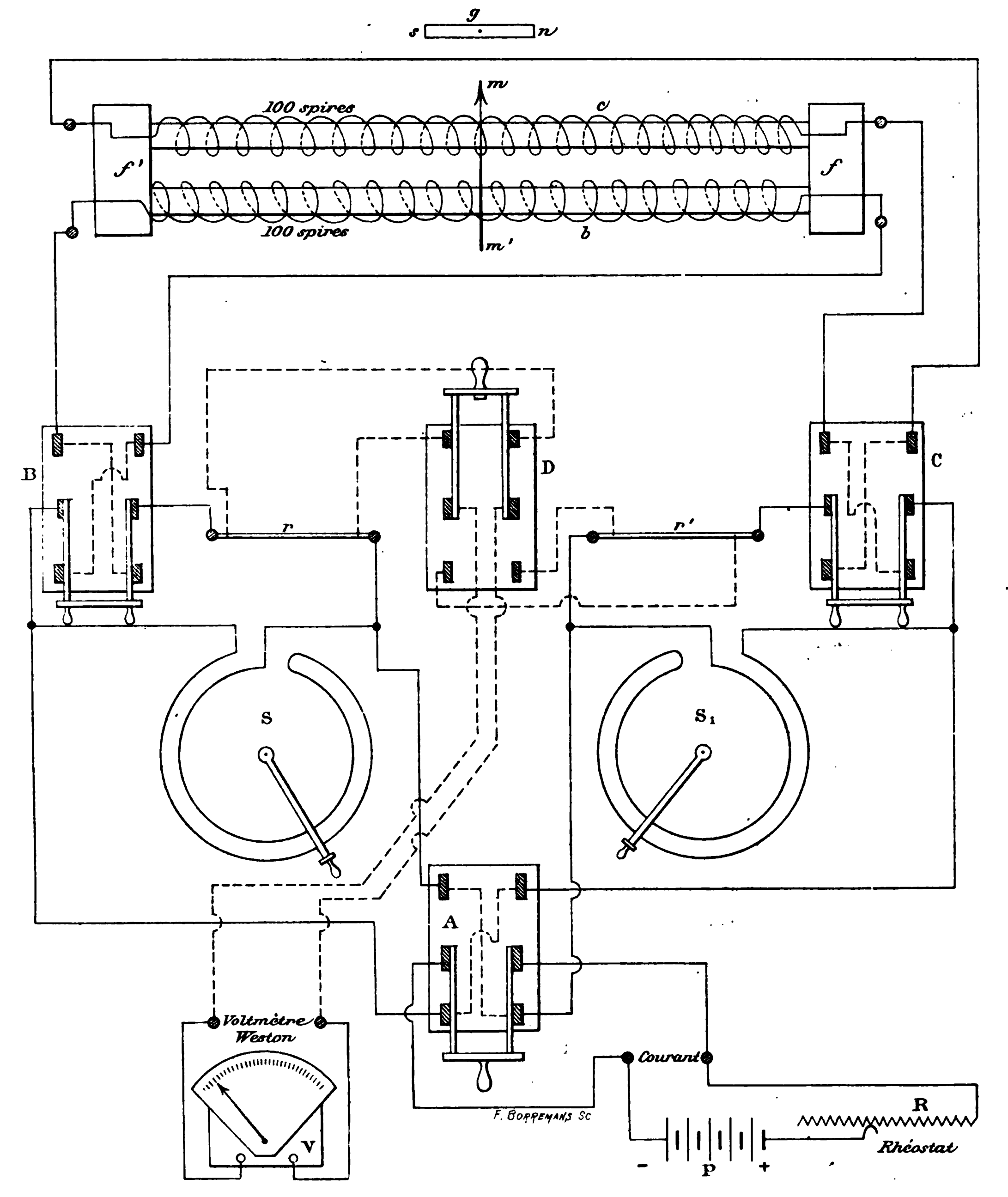


Fig. 51. — Pont magnétique de Franck Holden. — Schéma des connexions.

aimantée de l'ohmmètre est proportionnelle au rapport $\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$ c'est-à-dire à la perméabilité. Les galvanomètres G_1 G_2 donnent, d'ailleurs, séparément les valeurs de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$.

Si l'on dispose d'un courant alternatif, on peut évidemment supprimer les commutateurs C_1 C_2 du secohmmètre, à condition de remplacer l'aiguille aimantée de l'ohmmètre par une simple aiguille en fer doux.

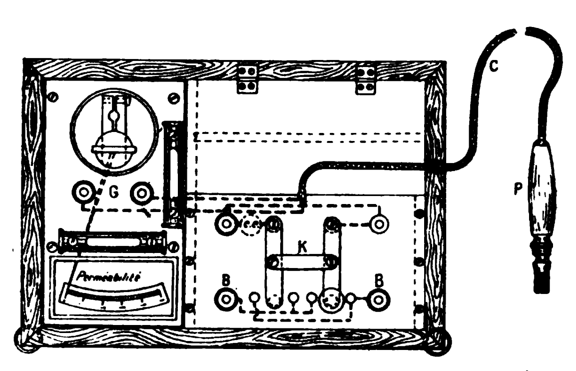


Fig. 46. — Perméamètre portatif. — Modèle simplifié.

Appareils portatifs. — M. Drysdale, dans le but de rendre sa méthode très facilement applicable, a combiné deux modèles d'appareils complets destinés à être employés dans les ateliers sans qu'il soit besoin d'aucun autre accessoire. Le modèle représenté par la figure 46 est le plus simple; il fournit directement les valeurs de la perméabilité.

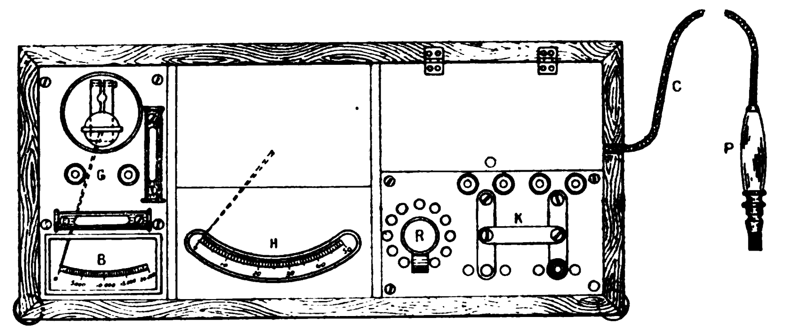


Fig. 47. — Perméamètre portatif. — Modèle complet.

Le modèle plus complet (figure 47) donne séparément les valeurs de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$, ce qui permet de tracer la boucle d'hystérésis (fig. 48).

L'appareil simplifié (fig. 46) est contenu dans une caisse en bois ayant 28 cm de long, 19 cm de large et 30 cm de hauteur. Un compartiment à couvercle contient deux grands éléments de

pile à liquide immobilisé, reliés à un inverseur K. Le bouchon d'épreuve P est relié à l'appareil par un long câble C à quatre conducteurs. Il aboutit à l'inverseur K et à un galvanomètre balistique G, du type d'Arsonval. Ce galvanomètre est directement gradué en valeurs de μ. Deux niveaux à bulle d'air permettent de placer l'appareil bien horizontalement. Un compartiment ménagé à la partie inférieure sert à ranger le bouchon d'épreuve P ainsi qu'un jeu des forets spéciaux nécessaires pour pratiquer les cavités convenables dans les masses, coulées ou forgées, à étudier.

Pour faire un essai, on pratique une cavité dans la masse à expérimenter; on met en place le bouchon P et on inverse le

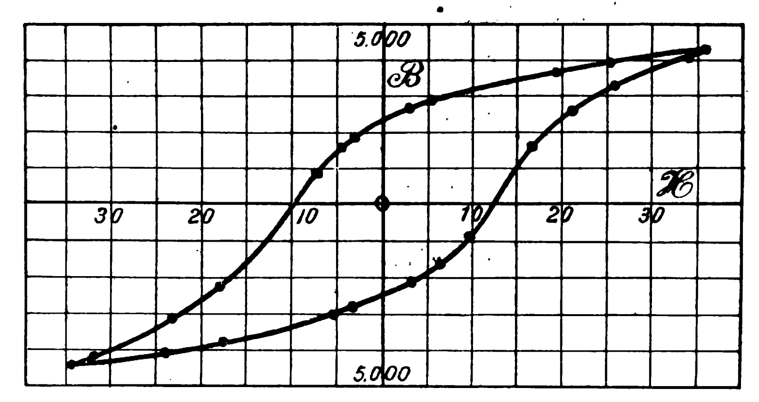


Fig. 48. — Boucle d'hystérésis d'un échantillon de fonte.

commutateur K. L'élongation du galvanomètre G indique alors la perméabilité. En interrompant le circuit et faisant une seconde lecture dans les mêmes conditions, on mesure la force coercitive.

L'appareil complet (fig. 47) comprend, en outre des accessoires précédents, un milliampèremètre H et un rhéostat R. Il a une longueur de 42 cm, les autres dimensions étant celles de l'appareil simplifié. Le galvanomètre balistique G est gradué en valeurs de $\mathcal{H}$; il porte de plus une graduation en valeurs de μ, cette graduation n'étant utilisable que lorsqu'on fait $\mathcal{H} = 100$ gauss.

Au point de vue des détails d'exécution des instruments ci-dessus décrits, on peut signaler que les forets sont interchangeables et donnent tous une tige identique de matière réservée suivant l'axe de la cavité creusée. Ce point est très important pour éviter l'effet de joints inégaux entre cette tige et le bouchon

de fer dans lequel pénètre une certaine longueur de cette tige. Les bobines, magnétisante et d'épreuve, sont roulées sur une carcasse en bronze, fendue suivant une génératrice, afin d'y éviter les courants de Foucault.

La longueur de la petite tige en essai dans la cavité est exactement de 12,6 mm. Le bouchon P est ajusté à cet effet par le constructeur. La tige expérimentée étant de très petit diamètre, il peut y avoir une cause d'erreur provenant de ce que la bobine d'épreuve n'est pas directement enroulée sur cette tige. On élimine l'erreur qui en résulte en enroulant simultanément sur une bobine dite de compensation quelques spires de deux fils respectivement montés en série avec les bobines magnétisante et d'épreuve.

Soient d_1 et d_2 les diamètres respectifs de la tige D essayée et de la bobine d'épreuve; on fait un essai en inversant le courant dans la bobine magnétisante sans noyau de fer. Soit D l'élongation. L'élongation corrigée serait :

$$D' = D . \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_2^2}.$$

On règle le nombre de spires de la bobine de compensation de manière à obtenir précisément une élongation égale et de signe contraire à D'.

La bobine de compensation est marquée *CC* sur la figure 43. La plus grande valeur atteinte pour $\mathcal{H}$ dans les essais de ce genre est $\mathcal{H} = 100$ gauss. Cette valeur correspond à 100 milliampères, étant donnés les dimensions et le nombre de spires du bouchon explorateur. Un dispositif de fourchette à vis permet d'immobiliser les équipages galvanométriques pendant le transport des instruments. Il est bon de faire observer qu'il faut avoir un peu d'habitude pour forer une cavité dans un échantillon sans briser la tige centrale. Cette tige étant bien guidée par le foret et étant de plus élastique, il suffit de maintenir le foret bien d'aplomb pendant le forage du trou.

MÉTHODE DE COMPARAISON

Principe. — La méthode de mesure de la perméabilité par comparaison consiste à comparer les résultats obtenus en soumettant aux mêmes inductions successives un barreau ou éprouvette constituant un étalon magnétique secondaire et une éprouvette de mêmes dimensions prise dans le métal à essayer.

L'étalon magnétique secondaire est ainsi appelé parce que l'on a tracé sa courbe d'induction $\mathcal{B}$ en fonction d'une série de forces magnétisantes $\mathcal{H}$ par la méthode du galvanomètre balistique. De la courbe obtenue en fonction de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$, on déduit la valeur de la perméabilité $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$.

Les éprouvettes, étalon et échantillon, du métal à essayer sont introduites ensemble ou successivement dans un circuit magnétique qu'ils complètent en le fermant le mieux possible.

Un dispositif approprié, constituant un simple indicateur, permet de comparer les inductions obtenues dans les deux éprouvettes pour les diverses valeurs de la force magnétisante.

Avec les données expérimentales ainsi obtenues et la courbe d'induction de l'éprouvette étalon, on peut tracer la courbe d'induction du métal essayé et déterminer ensuite la valeur de sa perméabilité.

Bien que moins précise que les méthodes directes, la méthode de comparaison donne des résultats suffisamment approchés pour les besoins de la pratique et présente le grand avantage d'être d'un mode opératoire simple et rapide.

Pont magnétique d'Ewing. — Le pont magnétique d'Ewing, dont la figure 49 montre la disposition schématique, se compose d'un circuit magnétique constitué par deux barreaux ou éprouvettes *ee'*, *ff'*, dont l'un est l'étalon de comparaison, préalablement étudié par la méthode balistique, et l'autre, l'échantillon du métal à essayer.

Les deux éprouvettes doivent avoir la *même section* et leurs extrémités sont solidement serrées par des vis dans des logements pratiqués dans les culasses *hh'* qui ferment le circuit magnétique. Les réluctances des culasses et des joints sont considérées comme négligeables.

L'éprouvette étalon *ee'* est recouverte d'une bobine magnétisante *a* comportant 100 spires de fil; la bobine qui entoure l'éprouvette à essayer est formée de 210 spires. Pendant l'enroulement de cette dernière bobine, on a soudé de place en place sur le fil, des dérivations aboutissant aux plots de deux commutateurs multiples B et E. Le commutateur B sert à introduire ou à retirer du circuit des groupes de 10 spires, depuis 100 jusqu'à 210 spires. Le commutateur E permet d'intercaler dans le circuit ou d'en retirer séparément chacune des spires de droite de la bobine. Pour ne pas compliquer le dessin, on n'a pas représenté toutes les spires. Les deux commutateurs étant montés en série, il est facile d'ajouter ou de retrancher un nombre quelconque de

spires; on en utilise par exemple 183, en disposant les manettes des commutateurs comme l'indique la figure 49.

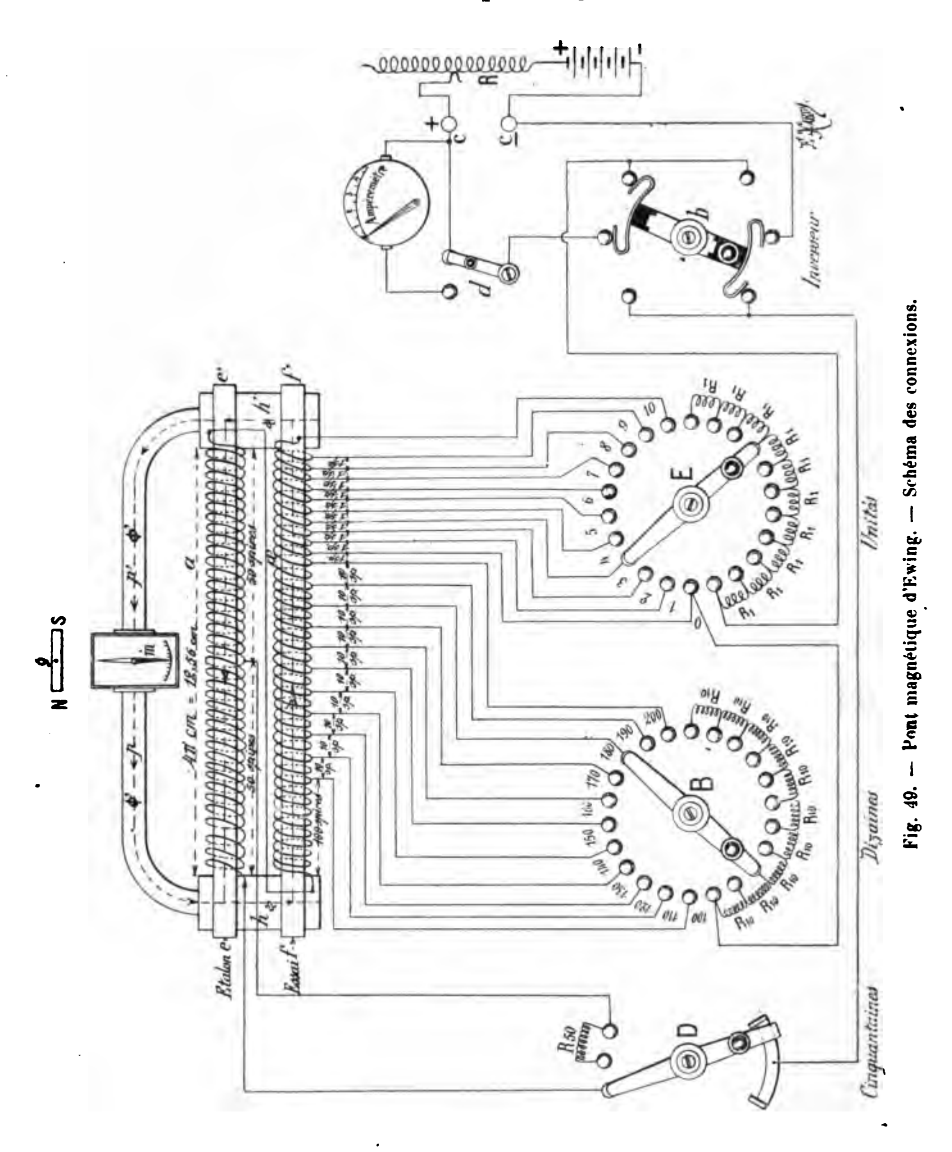


Fig. 49. — Pont magnétique d'Ewing. — Schéma des connexions.

Afin de ne pas faire varier la résistance du circuit par l'addition ou la suppression de spires, les manettes B et E suppriment ou ajoutent automatiquement des résistances équivalentes R_{10} et R_1. La bobine qui entoure l'éprouvette étalon peut également agir

avec 50 ou 100 spires par la manœuvre du commutateur D qui met en même temps en circuit ou supprime, suivant le cas, une résistance de compensation équivalente.

Le courant, fourni par quelques accumulateurs, a son intensité mesurée par un ampèremètre qu'un interrupteur *d* permet de mettre à volonté en circuit. Il traverse d'abord un inverseur *b* et de là se rend dans les bobines magnétisantes, montées en série et reliées de manière à développer dans le circuit magnétique un flux Φ fermé sur lui-même et indiqué en pointillé.

Lorsque l'induction $\mathcal{B}$ est la même dans les deux éprouvettes, il ne passe aucun flux extérieurement d'une culasse à l'autre, tandis que si les inductions diffèrent, un flux de dispersion réunit ces culasses à travers l'air. Pour apprécier la présence ou l'absence de ce flux dérivé qui dénote l'inégalité ou l'égalité des inductions dans les éprouvettes, les culasses sont munies de pièces polaires *pp'* dont les extrémités recourbées aboutissent de part et d'autre de l'aiguille *m* d'une boussole sensible.

L'aiguille de cette boussole est orientée et maintenue au zéro par suite de la position convenable donnée à l'aimant directeur *g*. Lorsqu'un flux dérivé traverse les pièces polaires, l'aiguille *m* est déviée et il est possible par ce moyen de réduction à zéro d'observer l'égalité des inductions dans les éprouvettes.

Pour se servir de l'instrument, on met les éprouvettes en place en les serrant fortement au moyen des vis placées sur les culasses, puis on règle le rhéostat R de manière à obtenir un certain courant, 1 ampère par exemple.

Le commutateur D étant placé de manière à faire agir les 100 spires de la bobine *a*, on manœuvre les commutateurs B et E des dizaines et des unités de spires, jusqu'à ce qu'il ne se produise plus de *déviation permanente* de l'aiguille *m*, qui éprouve toujours néanmoins quelques oscillations passagères pendant le réglage. Afin de diminuer l'influence de l'hystérésis qui empêche les inductions d'atteindre leurs véritables valeurs, on inverse plusieurs fois le courant au moyen de *b*; pendant ces inversions, l'aiguille ne doit pas subir de *déviation permanente* si le réglage des commutateurs B et E est bien fait.

Comme le barreau étalon est constitué par un métal de perméabilité très élevée, il faut toujours faire agir au moins 100 spires sur l'éprouvette *f'* en expérience. Lorsque le métal de cette éprouvette a une perméabilité tellement faible que l'action des 210 spires agissant sur elle ne peut produire la même induction que celle qui est développée dans l'étalon par les 100 spires

de la bobine *a*, on enlève 50 spires sur cette dernière par la manœuvre du commutateur D.

La longueur utile *L* des éprouvettes entre les culasses est exactement de 12,56 cm $= 4\pi$; quand on fait agir les 100 spires de la bobine *a*, l'induction dans l'étalon est directement donnée par la lecture à l'ampèremètre, chaque ampère correspondant à $\mathcal{H} = 10$ gauss, par suite même du choix des facteurs de construction $L = 4\pi$ et $n = 100$ spires.

Quand la bobine *a* est réduite à 50 spires, $\mathcal{H} = 5$ gauss par ampère. On a dans tous les cas $\mathcal{B} = \mu\mathcal{H}$, pourvu que les éprouvettes aient bien même section. Si l'on désigne par N le nombre de spires qu'il a fallu intercaler dans la bobine de l'éprouvette en expérience pour annuler toute déviation permanente de l'aiguille *m* de la boussole, l'induction $\mathcal{B}'$ dans le métal essayé est donnée par la relation :

$$\mathcal{B}' = \frac{N}{100} 10.I = \frac{NI}{10}$$

I étant exprimé en *ampères*, puisque le facteur 10 intervient pour passer de l'unité *C. G. S.* d'intensité de courant à l'unité pratique.

S'il fallait réduire à 50 le nombre des spires actives de la bobine *a* afin d'obtenir l'égalité d'induction, on aurait pour valeur de l'induction dans l'éprouvette en expérience :

$$\mathcal{B}' = \frac{NI}{5}$$

Ce cas se présente lorsque le métal est très peu perméable. (Acier pour aimants permanents, par exemple.)

Pour déterminer la perméabilité μ' de l'échantillon à une induction $\mathcal{B}'$, on emploie la courbe d'étalonnage fournie avec le barreau type, courbe qui fait connaître la perméabilité μ de ce barreau pour une induction $\mathcal{B}'$, égale à celle de l'échantillon.

Ces perméabilités étant en raison inverse des inductions, on a

$$\mu' = \frac{10I}{\frac{NI}{10}} = \frac{100}{N} \quad \text{d'où} \quad \mu' = \frac{100\mu}{N}$$

si les 100 spires de la bobine *a* ont été utilisées. Si on en a employé seulement 50, on a

$$\mu' = \frac{50\mu}{N}$$

La figure 50 représente une vue d'ensemble du pont magnétique d'Ewing, tel que le construit la maison Elliott de Londres. Sur cette figure, les appareils indiqués sur le schéma sont représentés par les mêmes lettres. Les éprouvettes se glissent dans les ouvertures des culasses en *ef*, on les maintient en place par le serrage énergique des boutons molettés visibles sur la figure. Les bobines magnétisantes sont protégées par une enveloppe *a* au-dessus de laquelle pend le support de l'aimant directeur *g*. La sensibilité de la boussole est telle que, lorsqu'on ajoute ou

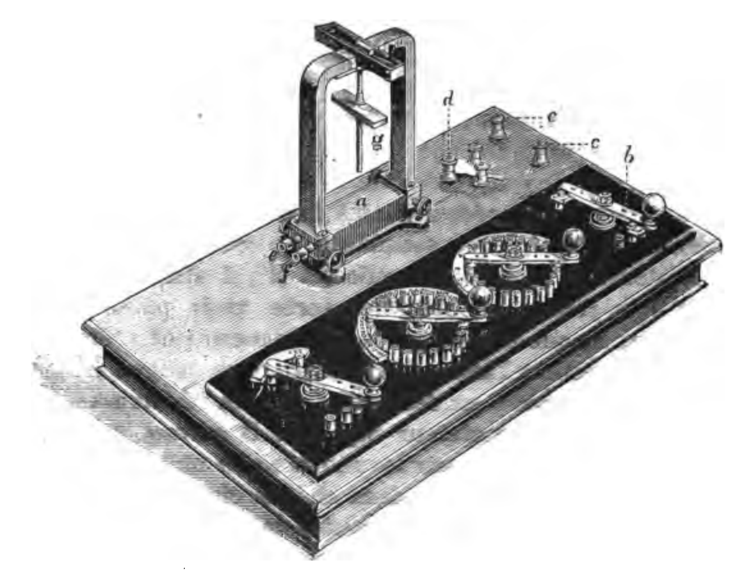


Fig. 50. — Pont magnétique d'Ewing.

retranche 1 spire sur la bobine de l'éprouvette *ff'*, l'aiguille *m* accuse une déviation permanente appréciable pour un courant de 0,5 ampère traversant l'instrument. On peut donc apprécier le 0,05 gauss. Le courant maximum que peut supporter l'instrument est de 10 ampères; par suite, la force magnétisante $\mathcal{H}$ peut atteindre 100 gauss. L'induction $\mathcal{B}$ est alors voisine de 20000 gauss, la section des éprouvettes étant de 1 cm² environ; la perméabilité μ du barreau étalon est sensiblement de $\mu = 200$ pour cette valeur élevée de $\mathcal{B}$.

Lorsqu'on veut déterminer la perméabilité de tôles minces, on emploie une éprouvette étalon formée également de tôles minces; quant à l'éprouvette d'essai, on choisit le nombre de tôles qui doit la constituer, de manière que les deux éprouvettes aient la

même section réelle de fer. L'emploi du pont d'Ewing permet de déterminer la perméabilité aussi rapidement qu'une mesure de résistance faite au pont de Wheatstone. La précision obtenue est bien suffisante en pratique.

Pont magnétique de Franck Holden. — Cet appareil repose exactement sur le même principe que celui d'Ewing, mais il est d'une construction un peu plus simple. Il est représenté schématiquement par la figure 51.

Les éprouvettes *b*, *c* étalon et métal à essayer formant avec les culasses *ff'* un circuit magnétique fermé dans lequel l'induction est développée par un courant qui peut varier indépendamment dans chaque bobine, celle-ci ayant un nombre constant de 100 spires agissantes.

Les pièces polaires du pont d'Ewing ont été supprimées et les dérivations magnétiques des culasses *ff'* agissent directement à travers l'air sur l'aiguille *mm'* de la boussole. Un aimant directeur *g* sert comme précédemment à fixer l'aiguille au zéro, tout en permettant de régler la sensibilité. Le courant fourni par des accumulateurs P traverse le rhéostat R'; il alimente les deux bobines *b*, *c* reliées en quantité, après avoir passé respectivement dans chaque circuit par les résistances *r* et *r'* étalonnées et servant à mesurer l'intensité du courant au moyen d'un voltmètre Weston branché en dérivation sur ces résistances.

A cet effet, le commutateur bipolaire D permet de relier le voltmètre aux fils dérivés sur les résistances *r* ou *r'*. Afin de faire varier la force magnétisante dans chaque circuit et d'une façon indépendante, on déplace les manettes de deux commutateurs à curseur *ss*, qui constituent deux résistances variables, shuntant respectivement les bobines *b* et *c*. En somme, on fait varier la force magnétisante en agissant sur le courant au lieu de modifier le nombre de spires actives comme dans l'appareil d'Ewing. Comme l'intensité du courant change indépendamment dans chaque bobine, il faut, entre chaque variation des résistances *s*, *s*, inverser plusieurs fois le courant dans les enroulements *b* et *c* au moyen des inverseurs B,C, afin d'éviter les effets de l'hystérésis qui produirait à faux des déviations permanentes de l'aiguille *mm'*.

Quand le réglage est achevé, l'aiguille *mm'* ne doit pas conserver de déviation permanente lorsqu'on manœuvre l'inverseur principal A. Il reste à lire l'intensité du courant dans les bobines *b* et *c* en manœuvrant le commutateur D. La graduation du voltmètre Weston est effectuée spécialement de 0 à 10 indiquant des forces magnétisantes de 0 à 100 gauss. Comme dans l'appareil

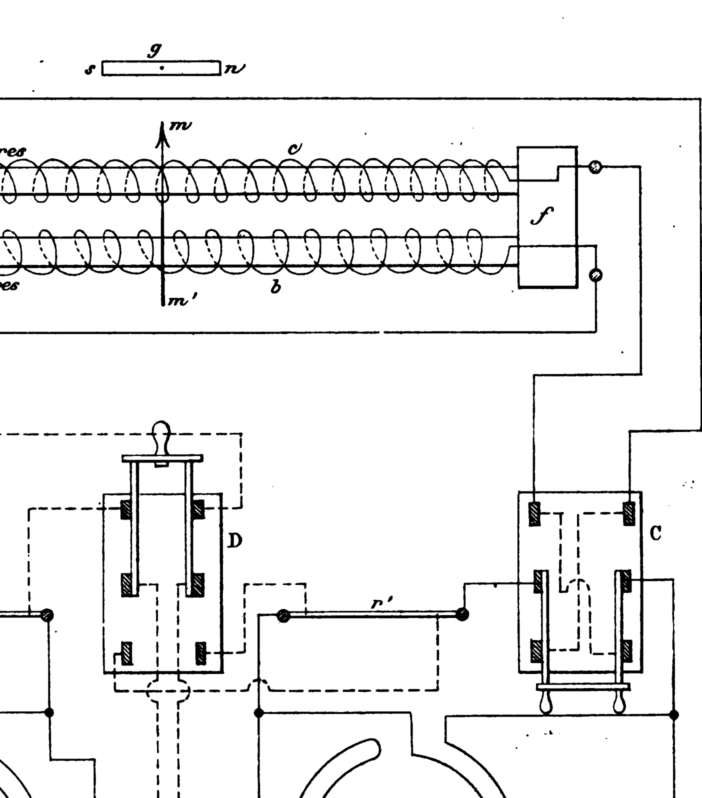


Fig. 51. — Pont magnétique de Franck Holden. — Schéma des connexions.

d'Ewing la longueur des éprouvettes est de 12,56 cm. La graduation du voltmètre Weston en valeurs de $\mathcal{H}$ est évidemment particulière pour chaque pont, puisqu'elle est fonction des résistances étalonnées rr'.

La figure 52 montre une vue d'ensemble du pont magnétique de M. Frank Holden. Au bas de cette figure on a représenté les

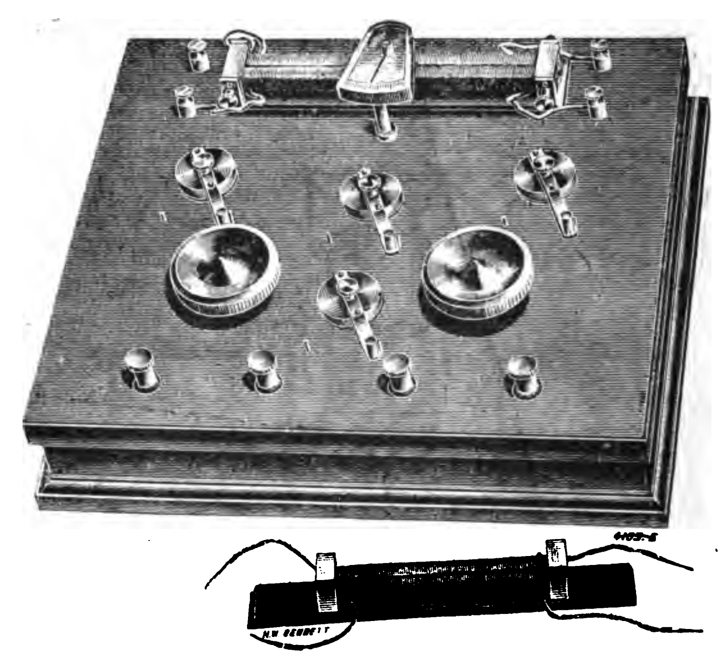


Fig. 52. — Pont magnétique de Franck Holden.

bobines et les culasses munies d'ouvertures appropriées pour l'essai de barreaux massifs. Les bobines et culasses figurées sur le pont lui-même sont disposées spécialement pour l'étude d'éprouvettes formées de bandes de tôles.

Une éprouvette étalon massive et une autre en feuilles de tôle, sont livrées avec chaque appareil; elles sont accompagnées de leurs courbes $\mu\mathcal{H} = \mathcal{B}$ déterminées par la méthode balistique. Le calcul de la perméabilité des échantillons est le même que lorsqu'on emploie le pont d'Ewing et la précision des mesures est du même ordre de grandeur.

IV

MESURE DE L'HYSTÉRÉSIS

Hystérésis. — Méthodes de mesure de l'hystérésis.
MÉTHODES DONNANT LE TRACÉ DE LA BOUCLE D'HYSTÉRÉSIS : Traceur magnétique d'Ewing.
MÉTHODES DIRECTES : Méthode du wattmètre. — Hystérésimètre d'Ewing. — Hystérésimètre de Blondel.

Hystérésis. — Dans les milieux de réluctance constante et de perméabilité égale à l'unité, une force magnétomotrice $\mathcal{F}$ donnée développe toujours le même flux de force magnétique $\Phi = \mathcal{H} S$ ou la même induction magnétique $\mathcal{B} = \mathcal{H}$, en supposant la réluctance du circuit magnétique égale à l'unité. Dans ce cas, on obtient l'*induction magnétique théorique.*

Lorsque la perméabilité du milieu considéré est supérieure à l'unité, il n'en est plus de même et l'induction obtenue, pour une même force magnétomotrice agissant sur un même circuit magnétique, est plus petite ou plus grande que l'induction théorique, suivant que la force magnétomotrice considérée a été précédée d'une autre plus petite ou plus grande ayant agi sur le dit circuit.

Dans le fer soumis à l'induction, la valeur de $\mathcal{B}$ est constamment en dessous de sa valeur théorique lorsqu'on soumet ce fer à des forces magnétomotrices de valeurs croissantes. Au contraire, la valeur de $\mathcal{B}$ est toujours supérieure à l'induction théorique lorsque les forces magnétomotrices qui agissent successivement vont en décroissant.

Ce phénomène a été dénommé *hystérésis* (qui veut dire : *rester en retard*) par M. Ewing. Toutefois, comme cette dénomination ne précise point par rapport à quoi ce retard se produit, il est important de bien préciser ce point. En effet, ce retard ne doit pas s'entendre par rapport au temps car, en maintenant constante la force magnétomotrice, l'induction n'atteint jamais sa valeur théorique, même après un temps infini. Le retard dont il s'agit doit être considéré comme un *écart positif ou négatif* de l'induction réelle sur l'induction théorique, suivant que la force

magnétomotrice qui produit cette induction croît ou décroît. Ces écarts ne sont d'ailleurs pas proportionnels aux variations de la force magnétomotrice; ils deviennent de plus en plus petits à mesure que la force magnétomotrice augmente en valeur absolue, c'est-à-dire qu'ils tendent vers zéro lorsque la perméabilité tend à se rapprocher de l'unité.

Pour le fer, la perméabilité tend vers l'unité pour des inductions très élevées voisines de la saturation ou lorsque la température est portée à 800°. Toutes choses égales d'ailleurs, les écarts entre l'induction réelle et l'induction théorique varient suivant les qualités magnétiques des échantillons de fer considérés.

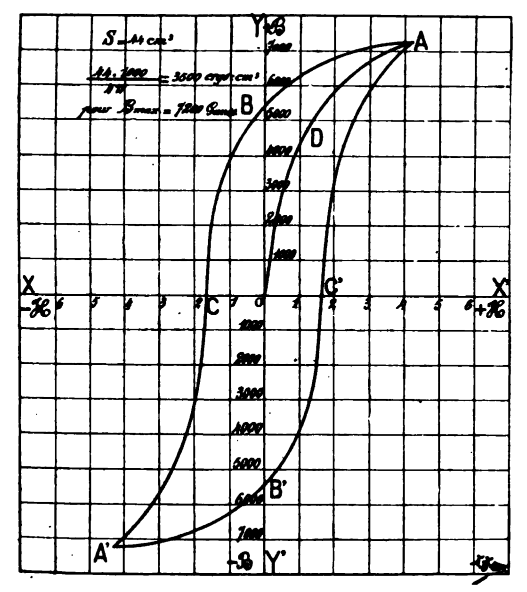


Fig. 53. — Courbe d'induction ℬ en fonction de l'intensité du champ ℋ ou boucle d'hystérésis.

Lorsque le fer est soumis pour la *première fois* à une induction croissante et partant de zéro, les valeurs de ℬ sont celles que l'on doit théoriquement obtenir. On dit alors que le fer est vierge de toute aimantation ou que, n'ayant conservé aucune trace d'induction antérieure, il peut être considéré comme tel.

D'après ce qui précède, si l'on trace la courbe de l'induction dans le fer en fonction de la force magnétomotrice ou du champ magnétique ℋ qu'elle développe, on obtient le graphique que montre la figure 53, graphique représentant les essais effectués sur un anneau de fer doux forgé.

Les valeurs de ℋ égales à 1, 2, 3, ... gauss sont portées en abscisses, sur la droite du zéro pour les valeurs positives, et sur la gauche pour les valeurs négatives. Les valeurs de l'induction ℬ sont portées en ordonnées, au dessus de X′X quand elles sont positives, et au dessous lorsqu'elles sont négatives.

Les valeurs de ℋ allant en augmentant d'une façon continue

depuis zéro jusqu'à 4,2 gauss, celles de $\mathcal{B}$ pour du fer vierge d'aimantation, sont représentées par la courbe O D A. Si à partir de A, on fait décroître $\mathcal{H}$ depuis 4,2 gauss jusqu'à zéro, les valeurs correspondantes de $\mathcal{B}$ sont représentées par la portion de courbe A B. L'intensité du champ $\mathcal{H}$ étant alors devenue nulle, on la fait croître négativement jusqu'à 1,6 gauss; c'est à ce moment seulement que l'induction $\mathcal{B}$ devient nulle; en continuant à faire croître négativement $\mathcal{H}$ depuis — 1,6 jusqu'à — 4,2 gauss, les valeurs de $\mathcal{B}$ croissent négativement de C en A', point symétrique de A par rapport à l'origine O des coordonnées.

Si l'on fait alors passer $\mathcal{H}$ de la valeur — 4,2 gauss à zéro, les valeurs de $\mathcal{B}$ sont représentées par la portion de courbe A'B' et $\mathcal{H}$ ayant à ce moment une valeur nulle, $\mathcal{B}$ vaut encore 5600 gauss. Enfin, $\mathcal{H}$ passant de zéro à + 4,2 gauss, les valeurs correspondantes de $\mathcal{B}$ sont représentées par la portion de courbe B'C'A.

En faisant parcourir indéfiniment à $\mathcal{H}$ le cycle + 4,2 gauss à — 4,2 gauss, la courbe d'induction sera toujours ABCA'B'C'A, sans que la courbe OA se reproduise; les portions de courbe ACA' et A'C'A sont symétriques et la surface limitée par la courbe fermée ABCA'B'C' représente une dépense d'énergie dissipée sous forme de chaleur. Cette perte d'énergie se renouvelle à chaque cycle complet et reste constante comme la surface considérée, lorsqu'on ne dépasse pas les valeurs $\pm\,\mathcal{H}$ correspondant à A et à A'.

Cette perte d'énergie s'exprime en ergs par centimètre cube de fer pour un cycle complet et une induction $\mathcal{B}_{max}$ donnée.

En employant des échelles dans le rapport de 1000 à 1, par exemple, pour représenter les valeurs de $\mathcal{B}$ et de $\mathcal{H}$, il suffit de planimétrer l'aire ABCA'B'C', de multiplier ensuite la surface exprimée en centimètres carrés par 1000 et de diviser le résultat par le facteur 4π pour obtenir la perte, exprimée en ergs, par centimètre cube par période ou cycle complet et pour l'induction maximum à laquelle le fer a été soumis :

$$\frac{S}{4\pi} = \text{ergs : cm}^3.$$

A chaque valeur de $\mathcal{B}_{max}$ correspond une surface S et, par suite, une perte d'énergie correspondante; cette perte étant constante, lorsqu'on se trouve dans les mêmes conditions, peut être représentée par un coefficient numérique qui a pour symbole η.

A la suite de nombreuses expériences, M. Steinmetz a trouvé

que, toutes choses égales d'ailleurs, la perte d'énergie par cycle était proportionnelle à la puissance 1,6 de l'induction maximum $\mathcal{B}_{max}$.

La perte d'énergie par unité de volume ou *énergie volumique* est le rapport $\frac{W}{V}$ de la perte totale d'énergie au volume du fer considéré, W étant exprimé en ergs et V en centimètres cubes.

La relation empirique de M. Steinmetz, qui se trouve à très peu près vérifiée dans tous les cas, est :

$$\frac{W}{V} = \eta\, \mathcal{B}_{max}^{1,6} \text{ ergs : cm}^3.$$

Pour le fer de meilleure qualité. . . $\eta = 0,0009$
— ordinaire. . . . . $\eta = 0,0080$
Pour l'acier trempé . . . . $\eta = 0,0260$

La courbe ABCA'B'C' (fig. 53) et, par suite, la valeur de la perte d'énergie volumique correspondante a été obtenue en faisant successivement croître et décroître $\mathcal{B}$ depuis $+\mathcal{B}_{max}$ jusqu'à $-\mathcal{B}_{max}$ d'une manière continue de $-4,2\ \mathcal{H}$ jusqu'à $+4,2\ \mathcal{H}$. La surface limitée par la courbe étant de 44 cm^2, la perte d'énergie volumique est donnée par la relation :

$$\frac{44 \,.\, 1000}{4\pi} = 3500 \text{ ergs : cm}^3.$$

Si l'on fait varier $\mathcal{B}$ d'une manière quelconque, en passant par des valeurs tantôt positives, tantôt négatives, sans procéder par variations progressives et régulières, la courbe obtenue est différente et l'aire de la courbe fermée plus grande ; dans ce cas, ce n'est plus un seul cycle parcouru pour aller de A en A' et en A, mais bien des portions supplémentaires de cycles différents.

Méthodes de mesure de l'hystérésis. — Les méthodes de mesure de l'hystérésis en fonction de l'induction maximum par cycle parcouru peuvent se diviser en deux classes :

1° Méthodes donnant le tracé de la boucle d'hystérésis ;

2° Méthodes directes.

MÉTHODES DONNANT LE TRACÉ DE LA BOUCLE D'HYSTÉRÉSIS

La plupart des méthodes de mesure de perméabilité précédemment décrites, qui permettent de tracer par points la

courbe d'induction magnétique $\mathcal{B}$ en fonction de l'intensité de champ $\mathcal{H}$, sont applicables à la détermination de l'hystérésis. Il faut rappeler que le circuit magnétique expérimenté ne doit contenir d'autre métal que l'échantillon.

Si on exprime $\mathcal{B}$ et $\mathcal{H}$ en gauss, dans cette courbe, il suffit de déterminer en centimètres carrés la surface S qu'elle limite au moyen du planimètre, par exemple, et cette surface, divisée par 4π, exprimera en ergs par centimètre cube la perte d'énergie due à l'hystérésis pour chaque cycle complètement parcouru et ayant atteint la valeur maximum qu'indique cette courbe. En divisant

$$\frac{W}{V}$$

qui représente l'énergie volumique, par le facteur $\mathcal{B}^{1,6}_{max}$, on obtient le coefficient η d'hystérésis, puisque l'on a :

$$\frac{W}{V} = \eta\, \mathcal{B}^{1,6}_{max}$$

L'énergie exprimée en ergs par centimètre cube, peut se traduire en watts par centimètre cube en la divisant par 10^7.

Prenons comme exemple la courbe déjà donnée (fig. 53). Les valeurs de $\mathcal{H}$ y sont portées en gauss et celles de $\mathcal{B}$ en kilogauss.

A l'échelle où a été tracée cette courbe, la surface ABC A'B'C'A est de 44 cm². Si $\mathcal{H}$ et $\mathcal{B}$ étaient à la même échelle, cette surface divisée par 4π indiquerait directement la perte hystérétique en ergs par centimètre cube, mais comme $\mathcal{B}$ est exprimé en kilogauss, cette surface doit être naturellement multipliée par 1000 et l'on a :

$$\frac{W}{V} = \frac{44.1000}{4\pi} = 3500 \text{ ergs : cm}^3$$

d'où

$$\eta = \frac{W}{V \,.\, \mathcal{B}^{1,6}_{max}} = \frac{3500}{7200^{1,6}} = 0,00233.$$

Le tracé de la courbe $\mathcal{B} = \mu\mathcal{H}$ par points nécessite des expériences d'une certaine durée, ce qui fait que le cycle ABC A'B'C'A est parcouru lentement. M. Ewing a remarqué que dans le cas d'un cycle parcouru en plusieurs secondes, la surface de cette courbe était trop faible.

Ceci tient à ce que, lorsqu'on applique une force magnétisante

donnée $\mathcal{H}$ et qu'on la maintient quelque temps, l'aimantation augmente encore pendant quelques secondes lorsque l'on se trouve dans la période ascendante du cycle, tandis que cette aimantation décroît encore pendant quelques secondes lorsqu'on se trouve dans la période descendante.

Les différences entre les surfaces obtenues peuvent atteindre 15 à 20 0/0, de telle sorte que l'on commet une erreur inévitable en déterminant le rapport $\frac{W}{V}$ par les méthodes qui donnent par points la courbe $\mathcal{B} = \mu \mathcal{H}$.

Il n'y a que lorsque le cycle est parcouru en moins de 0,05 seconde que l'on peut considérer l'hystérésis comme indépendante de la rapidité de parcours du cycle. M. Ewing a montré que la perte d'énergie volumique par cycle reste constante quand la fréquence varie de 20 à 150 périodes par seconde.

Traceur magnétique d'Ewing. — Afin de pouvoir tracer la courbe $\mathcal{B} = \mu \mathcal{H}$ en un temps suffisamment court, M. Ewing a combiné un appareil spécial qui se compose en principe d'un miroir concave mobile dans deux directions perpendiculaires. Il est sollicité dans une des directions proportionnellement à $\mathcal{B}$ et dans l'autre proportionnellement à $\mathcal{H}$. Un faisceau de lumière tombant sur le miroir est réfléchi par celui-ci sur un écran sur lequel un point lumineux se déplace suivant les positions résultantes du miroir. Ce point décrit la boucle d'hystérésis que l'on peut photographier. Grâce à l'emploi d'un rhéostat spécial à commutateur tournant, on peut faire décrire le cycle en une fraction de seconde. Cet instrument est d'un emploi un peu délicat, aussi n'est-il guère utilisé que dans les laboratoires.

MÉTHODES DIRECTES

Les méthodes directes sont au nombre de deux :

1° Méthode du wattmètre;

2° Méthode de la détermination du travail d'hystérésis par la mesure du moment d'un couple.

Méthode du wattmètre. — La méthode du wattmètre consiste à construire avec le métal à essayer le circuit magnétique d'un petit transformateur sans enroulement secondaire. L'enroulement primaire est alimenté par un courant alternatif de fréquence connue. On détermine la puissance absorbée par l'hystérésis au moyen d'un wattmètre. En pratique, on constitue le circuit magnétique au moyen d'un paquet B de tôles minces,

découpées comme le montre la figure 54 et fermé au moyen d'un autre paquet A.

Les tôles sont isolées au papier gomme-laqué ou simplement au vernis. Les bobines magnétisantes sont représentées en *bb'*; elles sont montées en série afin que le courant développe un flux fermé sur lui-même et entièrement contenu dans le fer. Le courant alternatif doit être fourni, autant que possible, par un alternateur dont la *courbe de tension* soit sinusoïdale, la courbe du courant étant forcément déformée par suite de l'hystérésis des tôles A et B. La puissance absorbée est mesurée avec un bon wattmètre dont le circuit dérivé doit avoir une réactance réduite au minimum. Cette puissance comprend l'énergie dissipée par hystérésis, la perte par effet Joule dans les bobines et celle due aux courants de Foucault dans les tôles. On peut négliger ces deux dernières pertes et considérer toute la puissance absorbée comme étant uniquement causée par l'hystérésis.

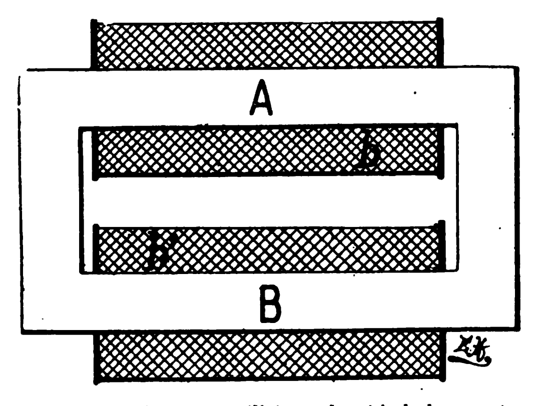


Fig. 54. — Transformateur utilisé avec la méthode du wattmètre.

Pour tarer l'instrument, le paquet A doit être constitué par les mêmes tôles que celles du paquet B. Comme les pertes par hystérésis sont proportionnelles aux poids, on peut déterminer celles qui sont relatives à la partie B du circuit. Soit P le poids en kilogrammes de A et P' celui de B. Le wattmètre indique une perte

$$W_1 = \frac{W}{P + P'} \text{ watts par kg.}$$

Le nombre de watts multipliés par P' donne la perte hystérétique $W_1 P'$ du circuit B. En remplaçant le paquet A par un autre, formé des tôles de fer à essayer, on trouve au wattmètre une perte totale

$$W' = W_1 P' + W_2 P'',$$

$W_2 P''$ étant la perte en watts du paquet A des tôles essayées; la

perte en watts par kilogramme pour l'échantillon A du poids P″ est, à la fréquence du courant d'excitation, donnée par la relation

$$W_2 = \frac{W' - W_1 P'}{P''};$$

en divisant ce résultat par la fréquence, on obtient la perte en watts par kilogramme et par cycle.

Il reste à déterminer la valeur de $\mathfrak{B}^{1,6}_{max}$ pour en déduire la valeur de η. Un simple ampèremètre permet de calculer $\mathfrak{B}_{max}$ si l'on connaît le nombre de spires des bobines bb' et la longueur moyenne du circuit magnétique. Pour cela, il y a lieu de remarquer que le circuit magnétique doit être fermé de façon à pouvoir négliger la réluctance des joints. Si le circuit magnétique était ouvert, on ne pourrait calculer le flux qu'en enroulant au-dessus des bobines quelques spires de fil isolé. La tension mesurée aux bornes de ces spires donne alors une mesure du flux.

D'un autre côté, avec un circuit magnétique ouvert, le facteur de puissance du système est très faible et la moindre réactance que peut avoir le circuit dérivé du wattmètre fausse les résultats. En pratique, les meilleurs wattmètres ne donnent plus de bonnes indications pour un décalage supérieur à 60° entre le courant magnétisant et la tension qui le fait circuler.

Enfin le circuit magnétique A B doit avoir une faible section par rapport à sa longueur moyenne, surtout si l'induction est un peu élevée (supérieure à 6000 gauss), autrement le périmètre intérieur se trouve porté à une induction plus élevée que les parties extérieures du circuit et on ne peut déterminer l'induction moyenne avec une approximation suffisante. En donnant aux paquets de tôles une section de 1 cm², il faut que la longueur moyenne du circuit magnétique atteigne 100 cm environ.

Si l'on tient compte, en outre, de la difficulté de se procurer des wattmètres indiquant une très faible puissance, on pourra en conclure que la méthode du wattmètre est, en somme, délicate et assez peu pratique industriellement, bien qu'au premier abord elle semble commode et rapide.

On peut compter en moyenne comme dépense d'énergie due à l'hystérésis $W = 1,5$ watt par kilogramme de fer, la fréquence étant 100 et l'induction maximum de 4000 gauss. En choissant les dimensions indiquées ci-dessus pour le circuit magnétique AB, on voit qu'il pèse environ 1 kg et que le wattmètre doit être d'une extrême sensibilité.

Hystérésimètre Ewing. — Cet instrument, construit par la

maison Elliott de Londres, est très portatif et permet la détermination rapide et suffisamment approchée du coefficient d'hystérésis des tôles employées dans la construction des dynamos et des transformateurs.

Dans cet instrument (fig. 55), le travail d'hystérésis, intégralement transformé en chaleur, est mesuré par un couple.

Un aimant, en forme de C, est suspendu verticalement sur un couteau d'acier reposant sur un V en agate. Son centre de gravité est amené un peu au-dessous de l'axe de suspension et le système est libre d'osciller. L'échantillon, composé d'un certain nombre de tôles, de forme convenable, est monté sur un support à mâchoires susceptible de tourner autour d'un axe horizontal.

L'échantillon tourne ainsi entre les pôles de l'aimant et subit des variations de flux, le flux étant maximum lorsque cet échantillon se trouve orienté suivant la ligne des pôles et minimum lorsqu'il est perpendiculaire à cette ligne.

Un entrefer est réservé de manière que l'échantillon ne puisse toucher l'aimant pendant son mouvement de rotation.

Lorsque la vitesse angulaire atteint une certaine valeur, l'aimant tend à suivre les tôles et s'incline vers la gauche ou vers la droite, suivant le sens de rotation.

Le moment du couple qui produit l'inclinaison de l'aimant équilibre le travail d'hystérésis.

Cet instrument constitue, en réalité, un simple *comparateur;* c'est par le rapport des inclinaisons que prend l'aimant, lorsqu'on fait successivement tourner entre ses pôles des échantillons-types et l'échantillon à essayer, qu'on détermine le coefficient η de ce dernier.

Les échantillons-types qui sont livrés avec l'hystérésimètre ont été étudiés, par le constructeur, au moyen de la méthode balistique et ont des coefficients η choisis l'un très petit, l'autre très grand. Le coefficient η des tôles à essayer est, par suite, presque toujours compris entre ceux des échantillons-types.

Comme le montre la figure 55, le socle qui supporte l'instrument est muni de vis calantes servant à le placer de niveau. Ce socle est en marbre et a 20 cm de côté.

Le plan d'agate est supporté par une colonne en bronze de 30 cm de hauteur. Il peut être relevé ou abaissé, au moyen d'un bouton moletté qui commande un excentrique analogue à ceux employés pour le relevage du fléau des balances de précision.

L'aimant, lorsqu'on tourne le bouton moletté, peut venir reposer par son couteau sur le V en agate ou être soutenu par une fourchette d'immobilisation.

Il porte, à sa partie supérieure, une aiguille en aluminium dont l'extrémité est mobile devant la graduation tracée sur un cadran.

Ce cadran est recourbé en forme d'arc d'un cercle dont l'arête du couteau forme le centre.

A l'extrémité inférieure, l'aimant porte une tige filetée le long de laquelle on peut déplacer une masse servant à faire varier la position du centre de gravité de la partie mobile. On augmente ou on diminue la sensibilité de l'instrument en élevant ou abaissant cette masse.

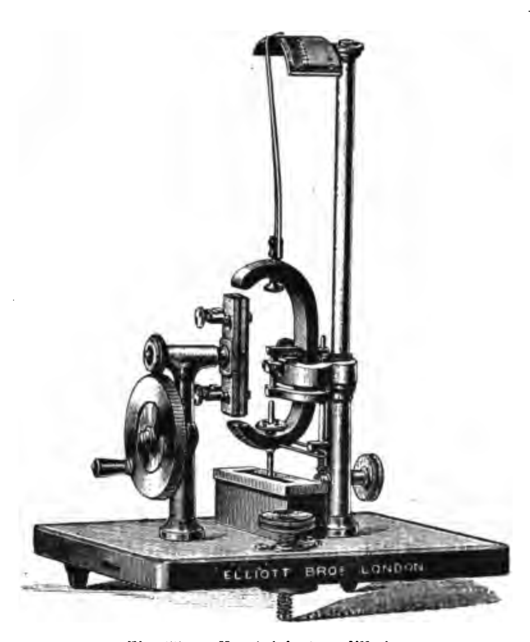


Fig. 55. — Hystérésimètre d'Ewing.

Le prolongement de la tige filetée se termine par une petite plaque qui plonge dans une boîte contenant de l'huile servant à amortir les oscillations de la partie mobile.

L'aimant porte également, perpendiculairement à l'arête du couteau, des tiges filetées placées horizontalement de part et d'autre. Le déplacement des masses mobiles sur ces tiges a pour objet de régler la verticalité de l'aimant.

Les échantillons sont formés de rectangles de tôles qui ont exactement 76,5 mm de longueur sur 16,5 mm de largeur. Ils comprennent un nombre de tôles, variable suivant l'épaisseur de celles-ci (4 à 7 en général).

Ce nombre est d'ailleurs déterminé par la condition que les échantillons à essayer doivent avoir *à peu près* le même poids que les échantillons-types. L'important est que les dimensions soient *rigoureusement* celles indiquées ci-dessus. S'il en était autrement, l'entrefer ne serait pas le même pour les divers échantillons et les inductions étant, par suite, différentes, les résultats ne seraient pas exacts. Afin d'éviter toute cause d'erreur de ce chef, un calibre en acier trempé accompagne chaque ins-

trument. Il permet d'ajuster à la lime et d'une façon précise les bandes de tôle préalablement découpées à la cisaille ou au poinçon.

Le support à pince sur lequel les échantillons sont montés est en bronze et reçoit son mouvement de rotation d'un petit volant qui l'entraîne par friction. Les échantillons sont disposés sur le support à pince de manière que l'une de leurs extrémités vienne parfaitement s'appliquer contre le talon de ce support.

Réglage de l'hystérésimètre. — On commence par placer l'instrument sur une table en l'orientant de telle sorte que le plan de l'aimant se trouve à très peu près dans la direction du méridien magnétique. On évite ainsi l'effet de la composante verticale du champ terrestre sur l'aimant, effet qui tendrait à l'incliner. Le support étant dépourvu d'échantillon, le socle étant bien de niveau, on fait reposer l'aimant sur le V en agate afin de le rendre libre d'osciller. L'aiguille est amenée au zéro de la graduation en agissant sur les masses disposées sur les tiges filetées horizontales.

Il faut alors régler l'apériodicité ; pour cela on remplit le récipient à huile d'un mélange d'huile minérale (valvoline) et de pétrole. En faisant osciller le système, on reconnaît facilement s'il y a lieu de rendre le liquide plus visqueux ou plus fluide. Il est préférable d'employer d'abord un liquide trop visqueux que l'on additionne ensuite peu à peu de pétrole jusqu'à ce que l'on obtienne le résultat voulu. L'aiguille étant écartée de sa position d'équilibre, puis abandonnée à elle-même, doit y revenir, sans la dépasser, au bout d'environ 30 secondes. L'apériodicité est alors convenable. Il est nécessaire que le récipient contienne assez d'huile pour que l'aimant, étant incliné au maximum, la plaque constituant l'amortisseur reste toujours *complètement immergée.*

L'instrument est accompagné de deux échantillons-types, l'un marqué A et ayant un coefficient η très faible, l'autre B ayant au contraire un coefficient η très élevé ; c'est ce dernier échantillon qu'il faut employer pour régler la sensibilité de l'hystérésimètre. A cet effet, l'échantillon B est mis en place bien exactement dans le support à pince. On fait tourner la manivelle du petit volant à la vitesse angulaire d'environ 120 tours par minute, puis on rend l'aimant libre. L'aiguille arrive peu à peu à sa position d'équilibre et doit s'arrêter vers la division 90, la graduation étant divisée en 100 parties de chaque côté du zéro. Si elle s'incline sensiblement moins, on relève la masse mobile sur la tige filetée placée à la partie inférieure, jusqu'à ce que la sensibilité ait été suffisamment augmentée pour que la déviation atteigne 90 divi-

sions environ. Dans le cas où la déviation serait trop grande, on abaisserait convenablement la masse.

On vérifie que la déviation est à très peu près la même, de chaque côté du zéro, lorsqu'on tourne la manivelle d'abord dans un sens, puis dans l'autre. Quand on la tourne dans un sens, il faut attendre de 30 à 35 secondes avant de faire la lecture et de commencer à tourner en sens contraire. On suit l'aiguille des yeux et, quand la déviation n'augmente plus, on note le point où elle s'arrête.

L'échantillon B étant remplacé par l'échantillon A, les déviations, de part et d'autre du zéro, ne sont plus que de 30 divisions environ lorsqu'on recommence les opérations précédentes. L'hystérésimètre est alors prêt pour effectuer des essais.

Mode opératoire. — Pour faire une mesure, on prépare un échantillon avec les tôles à essayer, suivant les indications précédemment fournies et en observant particulièrement les dimensions et la position donnée aux tôles dans le support à pince. On dispose successivement dans ce support l'échantillon A, l'échantillon B, puis enfin l'échantillon X qu'on veut expérimenter.

Dans chacune des trois opérations, on note les déviations à gauche et à droite en ayant soin de tourner la manivelle le plus uniformément possible et à une vitesse angulaire d'environ 120 à 130 tours par minute. Si la vitesse est trop faible, l'aiguille se déplace par saccades; au contraire, si la vitesse, étant voisine de 120 tours par minute, on vient à l'augmenter notablement, on constate que l'aiguille, qui s'était primitivement arrêtée devant une certaine division, continue à s'écarter de plus en plus du zéro. C'est l'indice d'une vitesse exagérée; des courants de Foucault se développent dans les tôles et dans l'aimant et les résultats se trouvent faussés.

Ces opérations donnent lieu à six lectures : $a\,a'$ pour le type A; $b\,b'$ pour le type B; $x\,x'$ pour le type X.

On fait les moyennes

$$\frac{a+a'}{2}, \quad \frac{b+b'}{2}, \quad \frac{x+x'}{2}$$

et l'on a ainsi les données expérimentales nécessaires pour déterminer le coefficient η_x de l'échantillon X. Lorsqu'on veut soumettre aux essais une série d'échantillons, il est inutile de recommencer chaque fois les essais avec les échantillons-types. Il suffit, en effet, de faire repasser les types A et B dans l'hystérésimètre après qu'on a essayé cinq ou six échantillons, afin de

voir si les déviations respectives qu'ils donnaient au début des opérations conservent la même valeur; cette vérification est indispensable.

Il reste à déterminer le coefficient η_x et pour cela on opère de la manière suivante : On trace sur du papier quadrillé au millimètre deux axes OX, OY perpendiculaires (fig. 56).

L'axe OY représente les déviations moyennes de l'aiguille et est donc divisé en 100 parties égales. L'axe OX représente, au contraire, les pertes en ergs par centimètre cube et est divisé en 2000 parties égales. Pour fixer les idées, voici les données des types A et B livrés avec un hystérésimètre d'Ewing. Ces données

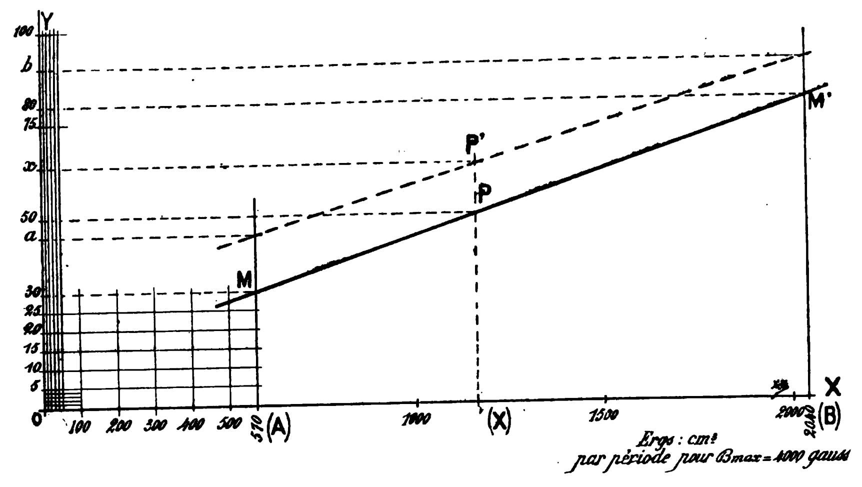


Fig. 56. — Graphique des essais effectués avec l'hystérésimètre d'Ewing.

ont été déterminées par M. Ewing lui-même au moyen de la méthode balistique et pour $\mathfrak{B}_{max} = 4000$ gauss :

Type A. 570 ergs : cm³ et par période pour une induction maximum de 4000 gauss. Type B. 2040 ergs : cm³ et par période pour la même induction maximum. Dans un essai avec l'échantillon A, on a obtenu 30 divisions comme déviation moyenne $\left(\frac{a+a'}{2}\right)$. Avec l'échantillon B, on a eu 80 divisions dans les mêmes conditions. Enfin avec l'échantillon X la déviation a été de 50 divisions.

Par les points 30 et 80 de l'axe OY on trace des parallèles à l'axe OX. Par les points 570 et 2040 de cet axe on élève des perpendiculaires et on joint par une droite les points MM' ainsi déterminés. Par le point 50 de l'axe OY, on mène une parallèle à

OX jusqu'à son point de rencontre P avec la droite MM'. La perpendiculaire abaissée du point P sur OX coupe cet axe à la division 1260. Ce chiffre indique la perte hystérétique en ergs par centimètre cube et par période correspondant à l'échantillon X pour une induction $\mathcal{B}_{max} = 4000$ gauss.

Le chiffre 1260 représente précisément le terme $\frac{W}{V}$ ou énergie volumique de la formule de Steinmetz

$$\eta = \frac{W}{V . \mathcal{B}^{1,6}_{max}}$$

L'énergie volumique ou travail absorbé par unité de volume et par période à cause de l'hystérésis suffit pour calculer le coefficient η lorsqu'on connaît l'induction maximum $\mathcal{B}$.

Dans le cas actuel $\mathcal{B}_{max} = 4000$ gauss et par suite $\mathcal{B}^{1,6}_{max} = 580000$; on a donc pour valeur de η_x :

$$\eta_x = \frac{1260}{580000} = 0,00216.$$

On voit de même que les coefficients η des types A et B sont respectivement

$$\eta_A = \frac{570}{580000} = 0,000982$$

$$\eta_B = \frac{2040}{580000} = 0,00351.$$

Si l'on désire obtenir la valeur de l'énergie volumique pour des inductions $\mathcal{B}_{max}$ différentes de 4000 gauss, il suffit d'employer le tableau suivant, établi pour les inductions les plus usuelles.

INDUCTIONS MAXIMA	COEFFICIENT RELATIF D'HYSTÉRÉSIS
$\mathcal{B}_{max} = 2000$ gauss	0,33
$\mathcal{B}_{max} = 2500$ »	0,47
$\mathcal{B}_{max} = 3000$ »	0,63
$\mathcal{B}_{max} = 4000$ »	1,00
$\mathcal{B}_{max} = 5000$ »	1,41
$\mathcal{B}_{max} = 6000$ »	1,89
$\mathcal{B}_{max} = 7000$ »	2,41
$\mathcal{B}_{max} = 8000$ »	3,00

Ces coefficients relatifs sont calculés par les rapports tels que :

$$\frac{\mathcal{B}_{max}^{1,6}}{4000^{1,6}} = \frac{\mathcal{B}_{max}^{1,6}}{580000}.$$

L'énergie volumique ayant été trouvée égale à 1260 pour $\mathcal{B}_{max} = 4000$ dans l'exemple ci-dessus, on aura évidemment pour $\mathcal{B}_{max} = 6000$.

$$\frac{W}{V} = 1260 \,.\, 1,89 = 2380 \text{ ergs : cm}^3 \text{ et par période.}$$

Au lieu d'être exprimée en ergs par centimètre cube et par période, l'énergie volumique est souvent exprimée en watts par kilogramme et pour une fréquence de 100 périodes pour seconde. On passe d'une donnée à l'autre en divisant la première par le coefficient 780 qui représente 100 fois la densité du fer.

Ainsi l'échantillon A qui, pour $\mathcal{B}_{max} = 4000$ gauss, cause une perte de 570 ergs par cm³ et par période donne :

$$\frac{570}{780} = 0,730 \text{ watt par kilogramme}$$

à la fréquence de 100 périodes par seconde et pour la même induction $\mathcal{B}_{max}$. Si l'on voulait connaître cette perte pour une autre fréquence, 40 périodes par seconde par exemple, il suffirait évidemment de multiplier la valeur précédente par le rapport $\frac{40}{100}$.

L'on aurait alors :

$$0,730 \cdot \frac{40}{100} = 0,292 \text{ watt par kilogramme.}$$

En se reportant à la figure 56, il est facile de voir que les verticales menées par les points 570 et 2040 sont toujours les mêmes, quelle que soit la sensibilité de l'instrument ; leurs extrémités qui aboutissent en MM′ changent seules et l'inclinaison de la droite MM′ varie.

On peut profiter de cette observation pour tracer, une fois pour toutes, les verticales passant par les points 570 et 2040.

Lors des essais ultérieurs, on place une feuille de papier à calquer sur le tracé (fig. 56) et, par les points *a*, *b*, *x* indiqués par

l'hystérésimètre, on mène des parallèles à OX jusqu'à leur rencontre avec les ordonnées AB. On trace la nouvelle droite qui détermine le point P'. S'il s'agit du même échantillon X que précédemment, la perpendiculaire abaissée de P' doit tomber sur le point 1260.

On évite ainsi l'obligation de recommencer à chaque fois une bonne partie du tracé graphique.

L'hystérésimètre d'Ewing, ne servant qu'à comparer des échantillons au point de vue du couple exercé par la réaction du travail d'hystérésis, donne des indications indépendantes des variations du moment magnétique que peut subir son aimant avec le temps.

Avec cet instrument, l'échantillon est soumis à une induction alternativement positive et négative.



Fig. 57.
Hystérésimètre Blondel-Carpentier.

Il se trouve dans le cas du fer soumis à une induction périodique, comme celui des transformateurs. L'hystérésis mesurée de cette manière est appelée *hystérésis alternative* par opposition à l'*hystérésis tournante* à laquelle est soumis le fer d'un induit de machine à courant continu. C'est l'hystérésis tournante que mesure l'appareil ci-après.

Hystérésimètre Blondel. — Cet instrument, que représente la figure 57, est construit par la maison J. Carpentier de Paris.

Il se compose d'un fort aimant en fer à cheval, mobile autour d'un axe vertical et actionné au moyen d'une transmission par friction, visible au bas de la figure 58. L'échantillon, formé d'anneaux de tôles, est placé, entre les pôles de l'aimant, sur un support mobile autour d'un axe vertical monté sur pointes.

Lorsqu'on fait tourner l'aimant, les anneaux de tôles tendent à être entraînés dans le sens du mouvement, mais un ressort spiral antagoniste s'oppose au déplacement et l'échantillon prend une position stable en bandant le ressort. Ce dernier est disposé dans un tube vertical rempli de valvoline qui sert à amortir les oscillations. Le support des anneaux porte un index mobile devant les divisions égales d'un cercle gradué. Ce cercle peut

tourner dans son plan afin qu'on puisse amener le zéro de la graduation en face de l'index lorsque l'aimant ne tourne pas.

Les anneaux de tôle ont un diamètre extérieur de 55 mm, leur diamètre intérieur étant de 38 mm. On en superpose suffisamment pour que l'épaisseur atteigne 4 mm. Ces anneaux sont découpés à l'emporte-pièce, puis recuits et enfin montés sur l'arbre. On fait tourner l'aimant à raison de 2 ou 3 tours par seconde et, quand l'index est immobile, on amène devant lui le zéro de la graduation. On fait alors tourner l'aimant en sens contraire et on lit la division devant laquelle s'arrête l'index. La rotation dans les deux sens est nécessaire ici aussi bien que lorsqu'on fait usage de l'hystérésimètre d'Ewing. Cette nécessité tient à ce que l'échantillon peut être aimanté d'avance ; dans ce cas la position occupée par l'index lorsque l'aimant ne tourne pas ne constitue pas un zéro effectif.

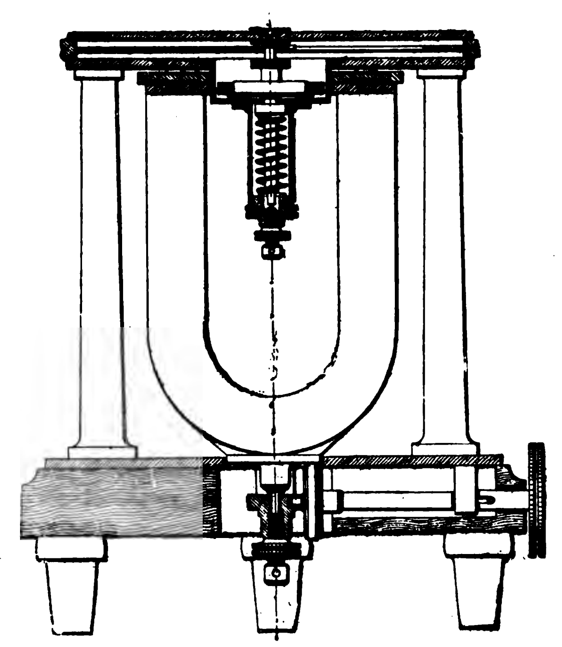


Fig. 58. — Coupe de l'hystérésimètre Blondel-Carpentier.

Soit V le volume en cm³ de l'échantillon; w le couple de torsion du ressort en ergs par radian; θ la lecture faite sur le cercle gradué; n le nombre de tours par seconde de l'aimant. On a pour valeur de la perte hystérétique : $n\,VW = n\pi w\theta$

d'où l'on tire : $$W = \frac{\pi w\theta}{V}.$$

il suffit donc en pratique de multiplier la lecture θ par un facteur numérique constant et déterminé une fois pour toutes.

Les hystérésimètres permettent d'obtenir des résultats exacts à 5 ou 6 pour 100 près. Cette approximation est bien suffisante dans la pratique, le coefficient d'hystérésis pouvant différer de

15 et 30 pour 100 quand on considère des points, même assez rapprochés, d'un même morceau de tôle. D'une façon générale le coefficient η est différent dans le sens du laminage et dans le sens perpendiculaire à ce laminage. Ce fait est à rapprocher de celui qu'on rencontre lorsqu'on fait subir des essais de résistance à la rupture à des éprouvettes découpées dans une même tôle suivant différentes orientations.

Remarques sur l'emploi des hystérésimètres. — Les indications fournies par les deux hystérésimètres ci-dessus décrits, diffèrent, pour un même échantillon, d'environ 25 pour 100. Cet écart, à peu près constant pour tous les échantillons, provient de ce que le premier instrument mesure l'hystérésis alternative. L'hystérésis tournante indiquée par le second est environ de 25 pour 100 plus élevée que l'autre.

Il est à remarquer que dans tous les essais indiqués précédemment pour déterminer l'hystérésis, on fait les mesures dans *l'état actuel* de l'échantillon.

On a observé que, lorsque les tôles ont été traitées spécialement, l'on pouvait obtenir des coefficients η extrêmement faibles.

Ces coefficients remontent ensuite peu à peu si la tôle est soumise au recuit ou à des vibrations rapides; les tôles vieillissent.

Il est bon, lorsque les échantillons ont été essayés dans leur état primitif, de les soumettre pendant une dizaine d'heures à l'action d'une température de 150° C environ.

On procède à de nouveaux essais et on compare le coefficient η trouvé à celui donné par l'expérience primitive.

Si le coefficient a augmenté, on peut être à peu près sûr que les tôles sont en métal instable ou qu'elles ont subi en usine une préparation destinée à diminuer artificiellement leur coefficient hystérétique.

Cette diminution n'est malheureusement que temporaire et l'on a vu des transformateurs qui, après avoir fonctionné quelque temps avec des échauffements raisonnables, atteignaient ensuite peu à peu des températures inacceptables.

On doit donc toujours essayer les tôles avant et après recuit. Si l'on rédige des spécifications d'essais à l'hystérésimètre pour des fournitures de tôles, on ne manquera pas de mentionner ce dernier point. On indiquera également, en outre, le type d'hystérésimètre à employer pour les essais, puisque, si les résultats fournis par un instrument de système donné sont comparables, ils diffèrent quand on les étudie avec un hystérésimètre d'une autre nature.

APPENDICE

TRANSFORMATIONS ALLOTROPIQUES DU FER ET TECHNIQUE MÉTALLOGRAPHIQUE DES ACIERS

Classification commerciale des aciers et des fontes d'après leur teneur en carbone. — Mélange eutectique. — Corps ajoutés aux mélanges fer-carbone pour modifier leurs propriétés. — Points critiques du fer pratiquement pur. — Etats allotropiques du fer pratiquement pur. — Points critiques des aciers. — Absence de points critiques pour certains aciers mixtes. — Constituants des mélanges fer-carbone. — Doctrine des phases. — Diagramme de Roozeboom. — Description des constituants des mélanges fer-carbone. — Solidification des mélanges fer-carbone. — Autres états supposés du fer. — Diagramme de Roozeboom complété. — Recherche des constituants dans les mélanges fer-carbone. — Marche de la recherche des constituants. — Interprétation des observations. — Application aux métaux magnétiques. — Conclusion. — Composition chimique de quelques aciers pour aimants permanents.

Dans le plan primitif de cet ouvrage, nous voulions limiter à un aperçu très sommaire l'exposé des procédés actuels employés pour l'étude du fer, des aciers et des fontes, au point de vue de la constitution du métal.

C'est la raison pour laquelle nous avions à peine effleuré ce sujet, au début du chapitre II, signalant seulement l'étude de ces métaux par l'examen de leur microstructure.

Plusieurs personnes nous ont fait remarquer l'importance du sujet et l'absence presque complète de documents y relatifs dans les ouvrages plus spécialement consacrés à l'électrotechnique. Ces considérations nous ont engagé à présenter la question d'une façon plus complète, car nous estimons que d'ici peu, les électriciens ne pourront plus ignorer les connaissances acquises sur l'élaboration et le traitement thermique des métaux magnétiques qu'ils emploient.

La majeure partie des renseignements contenus dans cet appendice ont été puisés dans les travaux les plus importants parus, en France, sur les connaissances modernes relatives aux mélanges fer-carbone (1). Nous y renvoyons le lecteur pour plus de

(1) *Contribution à l'étude des alliages*, publiée sous les auspices de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (1901). — *Métallographie microscopique*, par M. Cartaud, *Revue générale de chimie*

détails et pour les questions de bibliographie et d'historique, questions qui ne sauraient trouver place ici.

Classification commerciale des aciers et fontes d'après leur teneur en carbone. — Cette classification est la suivante :

I. *Métal contenant moins de* 0,05 0/0 *de carbone.*

C'est le fer pratiquement pur.

II. *Métal contenant de* 0,05 *à* 0,1 0/0 *de carbone.*

Acier dit « double extra-doux », devenant nerveux par la trempe. Coefficient de rupture, 35 à 40 kg : mm²; allongement, 32 à 28 0/0.

III. *Métal contenant de* 0,10 *à* 0,15 0/0 *de carbone.*

Acier dit « extra-doux », devenant nerveux par la trempe. Coefficient de rupture 40 à 45 kg : mm²; allongement, 28 à 26 0/0. Limite des aciers pour tôles d'induit et de transformateurs.

IV. *Métal contenant de* 0,15 *à* 0,20 0/0 *de carbone.*

Acier dit « très doux », ne se trempe pas. Coefficient de rupture, 45 à 50 kg : mm²; allongement, 26 à 24 0/0. Limite des aciers coulés magnétiques.

V. *Métal contenant de* 0,20 *à* 0,25 0/0 *de carbone.*

Acier dit « doux », ne se trempe pas. Coefficient de rupture, 50 à 55 kg : mm²; allongement, 24 à 22 0/0.

Cette teneur en carbone est le maximum de celle des aciers coulés magnétiques pour carcasses de dynamos.

VI. *Métal contenant de* 0,25 *à* 0,30 0/0 *de carbone.*

Acier dit « demi-doux », ne se trempe que très peu. Coefficient de rupture, 55 à 60 kg : mm²; allongement, 22 à 20 0/0.

VII. *Métal contenant de* 0,30 *à* 0,35 0/0 *de carbone.*

Acier dit « demi-dur », se trempe assez bien. Coefficient de rupture, 60 à 65 kg : mm²; allongement, 20 à 18 0/0.

appliquée (1902). — Conférence de M. Charpy à la Société internationale des électriciens (décembre 1902).

VIII. *Métal contenant de* 0,35 *à* 0,45 0/0 *de carbone.*

Acier dit « assez dur », se trempe assez bien. Coefficient de rupture, 65 à 70 kg : mm²; allongement, 18 à 15 0/0.

IX. *Métal contenant de* 0,45 *à* 0,50 0/0 *de carbone.*

Acier dit « dur », se trempe bien. Coefficient de rupture, 70 à 75 kg : mm²; allongement, 15 à 12 0/0.

X. *Métal contenant de* 0,5 *à* 0,6 0/0 *de carbone.*

Acier dit « très dur », se trempe très bien. Coefficient de rupture, 75 à 80 kg : mm²; allongement, 12 à 9 0/0.

XI. *Métal contenant de* 0,60 *à* 0,80 0/0 *de carbone.*

Acier dit « extra-dur », se trempe extra-bien. Coefficient de rupture, 80 à 100 kg : mm²; allongement, 9 à 5 0/0.

XII. *Métal contenant de* 0,8 *à* 0,9 0/0 *de carbone.*

Acier dit « double extra dur ».

XIII. *Métal contenant* 1,6 0/0 *de carbone.*

Il forme la limite des aciers forgeables et soudables.

XIV. *Métal à* 1,8 0/0 *de carbone.*

Il forme la limite des aciers forgeables mais ne se soudant plus.

XV. *Métal contenant de* 1,8 *à* 2 0/0 *de carbone.*

Limite extrême de ce qu'on peut appeler acier. Pour la teneur de 1,9 0/0 en carbone, le métal ne peut plus se forger, encore moins se souder. Avec la teneur de 2 0/0 en carbone on arrive au premier degré de la fonte.

XVI. *Métal contenant de* 2,5 *à* 3,5 0/0 *de carbone.*

C'est la fonte d'affinage; les qualités dites blanches, truitées ou gris clair sont destinées à élaborer le fer pudlé.

XVII. *Métal contenant de* 3,5 *à* 4,5 0/0 *de carbone.*

Ce métal constitue la fonte grise, dite de moulage, servant à couler les pièces des dynamos.

L'alliage à 4,3 0/0 de carbone fond à 1130°; c'est le plus fusible

des mélanges fer-carbone. Les mélanges ayant la composition correspondant au point de fusion minimum sont appelés *mélanges eutectiques* (1).

XVIII. *Métal contenant* 6,6 0/0 *de carbone.*

Ce produit constitue la limite extrême des fontes. Un mélange froid de fer-carbone ne peut contenir plus de 6,6 0/0 de carbone combiné. A l'état de fusion le mélange peut contenir beaucoup plus de 6,6 0/0 de carbone. Lorsqu'on le refroidit, il laisse déposer et expulse du graphite. Cette expulsion se continuant après le passage de l'état fondu à l'état solide, le mélange froid est formé de fer-carbone à 6,6 0/0 de carbone dans la masse duquel le graphite reste disséminé. Un tel produit est inutilisable industriellement; il contient des nids de graphite.

Mélanges eutectiques. — Lorsqu'un mélange fondu est composé de deux corps pouvant se solidifier *isolément*, la solidification commence, en général, à une certaine température et se termine à une autre température *inférieure* à la précédente. Lorsque les proportions relatives des deux corps sont convenables, la solidification peut s'effectuer à température *constante* et cette température est précisément celle à laquelle se termine la solidification dans le cas général. Il en résulte que, dans le cas du mélange convenable, la solidification s'effectue *en une fois* et à température minimum, c'est-à-dire que l'on a affaire au mélange le plus fusible que peuvent fournir les deux corps.

Les mélanges qui jouissent de la propriété de se solidifier ou de fondre à une température constante et minimum, sont appelés *mélanges eutectiques.*

Ces mélanges se comportent comme des corps simples ou des composés chimiquement définis, bien qu'ils ne soient que des mélanges. Lorsqu'on refroidit le mélange fondu de deux corps dont les proportions ne sont pas celles du mélange eutectique qu'ils peuvent éventuellement former, voici ce que l'on observe. Le corps en excès, relativement à la proportion eutectique, commence à se solidifier le premier. Cette solidification fait varier, par suite, la composition du liquide restant. Au fur et à mesure de l'avancement de cette solidification, le liquide restant ou *liquide-mère*, se rapproche de la composition eutectique. Son point de solidification s'abaisse donc et, lorsque le liquide-mère est parvenu à la composition exactement eutectique, il se solidifie à température constante et minimum. La température à

(1) *Eutectique* veut dire *qui fond bien*, de ευ *bien* et τηκω, *je fonds.*

laquelle se termine la solidification d'un mélange est donc toujours celle du mélange eutectique. Les combinaisons eutectiques solidifiées se présentent *invariablement* sous forme de simples mélanges de leurs constituants; ces mélanges sont très finement feuilletés, ce qui prouve combien est extrême leur état de division.

Tout mélange qui se présente ainsi sous forme de très fines lamelles est appelé, *par extension*, mélange eutectique. Un mélange eutectique solide peut se produire à une température convenable dans un alliage déjà solidifié, c'est-à-dire se séparer de son *dissolvant solide*. Il n'est plus ici question de température minimum de fusion. Les lamelles successives sont alternativement formées des deux corps constituant le mélange. On peut dire qu'un des corps constitue les lamelles paires et l'autre corps les lamelles impaires; ces lamelles ont une épaisseur d'environ $1\ \mu = 0{,}001$ mm.

Ainsi qu'on le verra plus loin, le mélange fer-carbone à 4,3 0/0 de carbone est un mélange eutectique à point de fusion minimum. C'est la fonte la plus fusible; elle se solidifie à la température de 1130 degrés et cette température reste constante pendant toute la durée du phénomène. L'acier à 0,85 0/0 de carbone fournit, par refroidissement lent, un mélange appelé eutectique, par extension, à cause de sa forme en lamelles alternées. Ce mélange commence à apparaître à la température de 690 degrés, alors que la masse est déjà solidifiée depuis longtemps (la solidification de l'acier à 0,85 0/0 de carbone commence à 1500 degrés et est terminée à 1400 degrés).

Les lamelles du mélange eutectique à 0,85 0/0 de carbone sont formées alternativement de fer pur et de carbure de fer. Ce mélange peut être considéré comme un mélange se séparant, à partir d'une température minimum, de son dissolvant solide.

Corps ajoutés aux mélanges fer-carbone, pour modifier leurs propriétés. — Les corps suivants peuvent être ajoutés aux mélanges fer-carbone, afin de faciliter leur élaboration ou pour modifier leurs propriétés. Parmi ces corps, quelques-uns préexistent et proviennent des impuretés du minerai ou du combustible. Les corps existants ou ajoutés aux mélanges fer-carbone se divisent en deux classes :

1° *Corps se mélangeant au fer et qui forment, à froid, une « solution solide ».*

Ils comprennent le nickel, le manganèse, le silicium, l'aluminium.

2° Corps ne se mélangeant pas au fer et se localisant entre les grains de ce métal.

Ils comprennent le soufre, le phosphore, le chrome, le tungstène, le molybdène, le titane.

Le nickel et le manganèse ont la propriété de réduire le développement en grosseur des grains de fer; leur présence est défavorable lorsqu'on recherche une haute perméabilité et un faible coefficient d'hystérésis.

L'aluminium, le silicium ou leur mélange présentent, au contraire, la propriété de développer en grosseur les grains de fer. Ces métaux sont donc favorables au point de vue des propriétés magnétiques.

Le soufre et le phosphore se trouvent localisés autour des grains de fer; ces corps existent à l'état de sulfure ou de phosphure de fer; leur présence est nuisible à tous points de vue.

Le chrome, le tungstène, le molybdène et le titane sont ajoutés au métal et entourent également les grains de fer. Ils existent à l'état de carbures doubles de chrome et de fer, de tungstène et de fer, etc., par exemple.

Les aciers contenant ces derniers carbures ont une dureté remarquable; ils sont excellents pour la fabrication des aimants permanents et des outils. Il y a lieu de remarquer que lorsque le mélange fer-carbone contient d'autres corps, les mélanges eutectiques ne correspondent plus tout à fait aux teneurs indiquées dans le paragraphe précédent.

Points critiques du fer pratiquement pur. — Lorsqu'on laisse le fer se refroidir lentement depuis son point de fusion (1600°) jusqu'à la température ordinaire, on constate que la température ne diminue pas d'une façon continue.

En certains points de la courbe du refroidissement tracée en fonction du temps, il existe des températures stationnaires. La température s'abaisse à peine pendant ces temps d'arrêts. Ce fait tient évidemment à un dégagement de chaleur provenant d'un changement d'état ou de phase dans le métal.

C'est ce dégagement de chaleur qui compense temporairement les pertes calorifiques et maintient quelque temps la température stationnaire.

Inversement, si on chauffe le fer depuis la température ordinaire jusqu'à 1600 degrés, on trouve qu'en certains points de la courbe d'échauffement, tracée en fonction de temps, la température cesse momentanément de s'élever. Il y a donc absorption de chaleur en ces points.

Les températures auxquelles correspondent les arrêts temporaires dans le refroidissement ou l'échauffement se nomment *températures* ou *points critiques*.

Lorsque le refroidissement ou l'échauffement ne sont pas extrêmement lents, les points critiques de refroidissement ne correspondent pas tout à fait à ceux d'échauffement; il y a hystérésis thermique. *Ces écarts de températures peuvent s'annuler si l'on opère avec assez de lenteur et le phénomène hystérétique disparaît, contrairement à ce qui se passe pour l'hystérésis magnétique.* On sait, en effet, que la perte hystérétique est indépendante de la rapidité de parcours d'un cycle magnétique.

Des points critiques existent également pour les aciers et les fontes. Les températures auxquelles correspondent ces points critiques diffèrent suivant la teneur en carbone.

Il est donc possible de connaître la teneur en carbone d'un mélange fer-carbone par la simple détermination de ces températures critiques. Celles-ci sont, d'ailleurs, corrélatives à des phénomènes extrêmement importants et l'on conçoit pourquoi les savants, parmi lesquels il faut citer surtout M. Le Châtelier, ont cherché avec tant de persévérance et créé les pyromètres sûrs et précis dont on dispose actuellement.

États allotropiques du fer pratiquement pur. — Le fer pur existe sous plusieurs états dont trois sont parfaitement reconnus depuis les recherches de M. Osmond. Ces états sont stables pour des températures déterminées et se nomment : état γ, état β, état α.

Au-dessus de la température de 850° C, le fer n'existe qu'à l'état γ. Il cristallise alors dans le système régulier ou cubique (forme octaédrique). Le fer γ *n'est pas magnétique*, mais *dissout le carbone*. La dissolution est à l'état solide entre 1600 degrés et 850 degrés.

Entre 850 degrés et 740 degrés. le fer γ se transforme brusquement en fer β, cristallisant dans le système régulier, en cubes plus ou moins maclés. Le fer β *n'est pas magnétique* et le *carbone y est insoluble.*

En dessous de 740 degrés, le fer β se transforme progressivement en fer α. Si le refroidissement est assez lent, la transformation est complète à 690 degrés. A cette température, le métal se réchauffe; sa couleur passe spontanément du rouge sombre au rouge vif. Ce phénomène, découvert il y a longtemps par Barrett, est connu sous le nom de *récalescence*. Le fer α cristallise en cubes, est *magnétique* et *ne dissout pas le carbone.*

D'autres états sont probables, l'un serait stable au-dessus de

1380 degrés (température appelée point de Ball) et l'autre vers 650 degrés et au-dessous.

Quoi qu'il en soit, on peut faire passer le fer de l'un à l'autre état par échauffement ou par refroidissement convenable et cela indéfiniment. On dit alors que les états du fer sont *réversibles.*

Lorsque le métal est à une température supérieure à 740 degrés, on peut le *tremper.* Le métal refroidi ainsi brusquement conserve, au moins en grande partie, l'état sous lequel il existait avant la trempe.

Ainsi, par exemple, en trempant le fer lorsque sa température est nettement supérieure à 850 degrés, le métal refroidi contient une certaine quantité de fer γ. Si la température de trempe avait à peine dépassé 740 degrés, on aurait obtenu du fer β. En un mot, la trempe empêche les transformations allotropiques; elle les arrête.

Ce procédé d'arrêt existant pour le refroidissement n'a pas de correspondant lorsqu'on échauffe le métal. Dans ce cas, lorsque les températures critiques sont dépassées, les transformations se produisent sans qu'on puisse les éviter. Ces transformations ne sont d'ailleurs pas instantanées; elles se produisent peu à peu et demandent un certain temps. Cela se conçoit facilement si l'on considère qu'elles s'effectuent dans un métal à l'état solide.

Les températures critiques sont toujours désignées par la lettre [A]. Ce sont pour le fer pur [A_3] (température de 850°), [A_2] (température de 740°), [A_1] (température de 690°).

Pour distinguer les points critiques obtenus au refroidissement de ceux relevés à l'échauffement, on affecte les lettres [A] de l'indice *r* ou *c*.

[A_{r3}], [A_{r2}], [A_{r1}] sont les points critiques au refroidissement tandis que [A_{c3}], [A_{c2}], [A_{c1}] sont ceux à l'échauffement.

Lorsqu'on arrête les transformations allotropiques par la trempe, on obtient dans le métal refroidi du fer dont l'état stable correspond à une haute température. A froid cet état du fer devrait être instable. On le dit *métastable*, car il ne subsiste qu'en vertu d'un faux équilibre.

Un recuit à température peu élevée (150 à 200°), des vibrations répétées, l'effet du temps à la température ordinaire, peuvent détruire ce faux équilibre. Les propriétés mécaniques se trouvent modifiées et le phénomène est particulièrement sensible pour certains aciers qui deviennent fragiles avec le temps. Les propriétés magnétiques peuvent également se transformer et

le vieillissement des tôles d'acier doux en est un exemple.

Points critiques des aciers. — Certaines des températures critiques des aciers diffèrent de celles du fer pur et s'abaissent avec la teneur en carbone.

Pour des teneurs données, il n'y a plus que deux points critiques (0,35 0/0 à 0,85 0/0 de carbone).

Il n'y a même plus qu'un seul point critique pour les teneurs en carbone dépassant 0,85 0/0. Ce point critique correspond à la température de récalescence.

Lorsque la teneur en carbone est telle que les points critiques

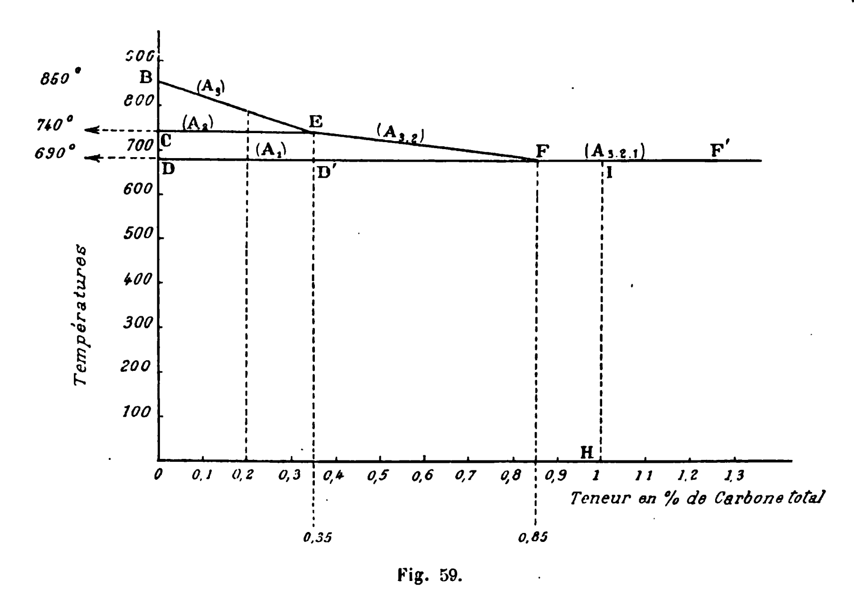


Fig. 59.

se réduisent à deux, on dit que l'acier a comme points critiques $[A_{3\ 2}]$ et $[A_1]$ affectés des indices *r* ou *c* suivant les cas.

Quand il n'y a plus qu'un seul point critique, il est désigné par $[A_{3\ 2\ 1}]$.

Ces diverses notations, qu'on rencontre dans tous les mémoires relatifs aux fers et aciers, sont indispensables à connaître.

Pour les aciers, le point critique $[A_3]$ varie linéairement de 850° à 740° quand la teneur en carbone passe de 0 à 0,35 0/0.

Le point critique $[A_2]$ correspond à la température constante de 740° pour toutes les teneurs en carbone de 0 à 0,35 0/0.

Pour ces mêmes teneurs le point $[A_1]$ correspond à la température constante de 690°.

Lorsque la teneur en carbone varie de 0,35 à 0,85 0/0, il n'y a

plus de point $[A_3]$. Le point $[A_{3\ 2}]$ varie linéairement, suivant la teneur, entre 740° et 690°.

Le point $[A_1]$ correspond constamment à 690°.

A partir de la teneur de 0,85 0/0 de carbone, les trois points critiques se confondent en un seul point $[A_{3\ 2\ 1}]$, correspondant toujours à 690°. Il en est de même pour les fontes, c'est-à-dire pour toute teneur jusqu'à 6,6 0/0 (limite des fontes).

La figure 59 montre schématiquement la représentation graphique de ces phénomènes.

Tout mélange fer-carbone dont la teneur en carbone est comprise entre 0 et 0,35 0/0 de carbone est composé de fer γ retenant le carbone en dissolution solide, lorsque la température est égale ou supérieure aux ordonnées de BE.

La solution de carbone dans le fer γ forme des cristaux appelés *cristaux mixtes*.

Lorsque la température est représentée par les ordonnées aboutissant entre CE et BE, le mélange est composé de fer β (sans carbone) et de cristaux mixtes (carbone dissous dans du fer γ).

Au-dessous de CE, mais au-dessus de DD′, le mélange est formé de fer α (sans carbone) et de cristaux mixtes (carbone dissous dans du fer γ).

Ces cristaux mixtes contiennent d'ailleurs *tout le carbone* du mélange, ce carbone restant donc en solution solide dans une certaine quantité de fer γ échappant à la transformation.

Il est remarquable que la quantité de fer γ échappant aux transformations en états β et α est juste celle qui est nécessaire pour dissoudre le carbone à la concentration 0,35 0/0. Ce phénomène est analogue à celui qui se produit en mélangeant la glace à du sel marin. La glace en fondant donne juste la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une solution saturée de sel, à la température où se trouve le mélange.

Les cristaux mixtes ont donc une composition constante (fer γ + 0,35 0/0 de carbone). Moins il y a de carbone dans l'acier, moins il reste de fer γ employé à le dissoudre à la température $[A_1]$.

Enfin, au-dessous de DD′ (690°), le mélange fer-carbone subit une transformation capitale.

Le carbone, qui était en solution solide, se combine avec une partie de fer α et forme un carbure de fer, Fe^3C contenant 6,6 0/0 de carbone. Donc en dessous de DD′ le mélange est constitué par du fer α, magnétique et sans carbone, et par du carbure de fer; le carbone, quelle que soit sa teneur dans l'acier, s'unit alors à une quantité suffisante de fer α pour former le carbure à 6,6 0/0

de carbone. Ce carbure Fe^3C est une combinaison chimique s'effectuant avec dégagement de chaleur. C'est ce dégagement qui produit la récalescence. Quand la teneur en carbone d'un acier est comprise entre 0,35 et 0,85 0/0, le fer γ susceptible de se transformer ne passe plus par l'état β; il arrive directement à l'état de fer α. En dessous de D'F le mélange est constitué par du fer α et du carbure de fer à 6,6 0/0 de carbone.

En examinant le schéma (fig. 59) on voit donc que :

BE est le lieu des points critiques $[A_3]$;

CE est le lieu des points $[A_2]$;

DF est le lieu des points $[A_1]$;

EF est le lieu des points doubles $[A_{3\,2}]$;

FF' est le lieu des points triples $[A_{3\,2\,1}]$.

Le carbure de fer Fe^3C se dissocie au-dessus de 700° et c'est ce qui explique comment on n'avait jamais pu l'obtenir en dissolvant le carbone dans du fer fondu.

Le carbure de fer cristallise très probablement en prismes rhombiques et peut s'extraire des aciers recuits ou des fontes blanches, en dissolvant ces mélanges dans des acides; il reste alors sous forme de résidu noirâtre.

Dans les aciers trempés à température suffisante on ne peut évidemment pas trouver de carbure de fer, la trempe ayant dû être effectuée au-dessus de 700° sous peine d'être inefficace. Aussi un acier trempé se dissout-il dans les acides, sans laisser de résidu, pourvu que la trempe ait été complète. On emploie l'acide chlorhydrique bouillant comme dissolvant.

Absence de points critiques pour certains aciers mixtes. — Dans certains aciers les courbes de refroidissement et d'échauffement sont continues. Les points $[A_3]$ $[A_2]$ $[A_1]$ n'existent plus; le fer ne subit donc pas de transformations allotropiques; il persiste à l'état γ à toutes les températures et le métal froid n'est pas magnétique. C'est le cas de l'acier au nickel contenant 0,6 0/0 de carbone et 25 0/0 de nickel. C'est aussi le cas de certains aciers au manganèse. Les aciers sans points critiques ne sont donc jamais magnétiques.

Constituants des mélanges fer-carbone. — On nomme constituants des fers aciers et fontes, les groupements moléculaires que l'on y rencontre suivant la teneur en carbone et suivant les traitements thermiques subis par le métal.

Les constituants nettement définis jusqu'ici sont :

1° *La Ferrite* ou fer α;

2° *La Cémentite* ou carbure de fer Fe^3C, contenant 6,6 0/0 de carbone et 93,4 0/0 de fer.

Ces deux constituants existant en proportions convenables donnent lieu à un mélange eutectique nommé *perlite*.

Ce mélange n'est pas un constituant proprement dit.

3° *La Sorbite;*

4° *La Martensite;*

5° *La Troostite;*

6° *L'Austénite;*

7° *La Hardenite;*

Ces divers constituants seront définis et décrits plus loin.

Doctrine des phases. — Cette doctrine, reposant sur l'interprétation de nombreux phénomènes expérimentaux, a pour objet la détermination des conditions d'existence (concentration, température, pression, etc.) de chacune des phases (solides, liquides et gazeuses) que peuvent former deux ou plusieurs corps en présence. Cette doctrine englobe les transformations allotropiques du fer et, appliquée aux aciers et fontes, permet de prévoir la nature des constituants qu'on obtient en traitant, dans des conditions de refroidissement données, les mélanges fer-carbone de diverses teneurs en carbone. Sans nous attarder à l'historique de la question ni aux travaux précurseurs des savants qui ont contribué à développer la doctrine des phases des mélanges fer-carbone, nous allons résumer l'état actuel de cette doctrine.

On peut la traduire par une représentation graphique mise au point par M. Roozeboom, représentation dont la figure 59 n'est qu'une partie.

Diagramme de Roozeboom. — Ce diagramme a été établi (fig. 60), en portant en abscisses les teneurs en carbone total (sans préoccupation de son état dans le métal) et en ordonnées les températures correspondant aux transformations allotropiques et à l'obtention des divers constituants désignés plus haut.

La ligne ABD indique les températures de fusion des alliages fer-carbone. Le fer pur fond à 1600° C. La température de fusion commence par diminuer, quand la teneur en carbone passe de 0 à 4,3 0/0. On voit que l'ordonnée menée par le point 2 0/0 de OX, coupe AB, en indiquant que la température de fusion de ce mélange (limite extrême des aciers) est de 1380° C.

Le point B, correspondant à la teneur 4,3 0/0, marque la température minimum (1130°) de fusion des mélanges fer-carbone. Ce point de fusion *à température mimimum* est une *température eutectique*.

Lorsque la teneur en carbone dépasse 4,3 0/0, la température de fusion remonte et atteint 1500° pour la teneur 7 0/0 de carbone total existant dans le métal *liquide*.

S'il y a moins de 4,3 0/0 de carbone total, la partie se solidifiant tout d'abord est une solution solide de carbone dans du fer γ. Cette solution solide constitue, comme il a été dit, les cristaux mixtes. Le liquide mère s'enrichit en carbone au fur et à mesure du refroidissement.

Deux cas peuvent alors se présenter.

a) Si la teneur primitive en carbone est assez faible pour que

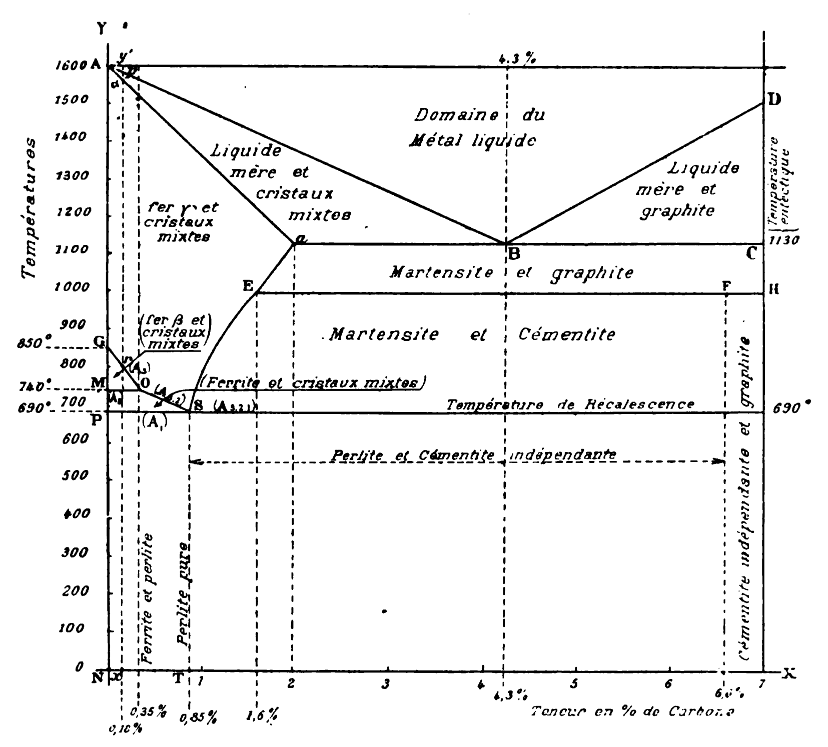


Fig. 60. — Diagramme de Roozeboom.

ce métalloïde puisse rester entièrement dissout dans le fer γ, la solidification s'effectue *sans arrêt*. Elle est terminée, suivant la teneur en carbone, à une température déterminée par les ordonnées aboutissant à la ligne *Aa* et menée par les points de *OX* correspondants à la teneur primitive en carbone (0 à 2 0/0).

b) Si la teneur en carbone dépasse 2 0/0, le fer γ solide est saturé de carbone et le liquide mère s'enrichit en carbone jusqu'à correspondre à la teneur 4,3 0/0 de carbone. Ce liquide mère constitue la fonte eutectique (fondant à 1130°), mélange de fer et de graphite. La solidification de ce mélange se produit

brusquement à 1130°. Le premier cas correspond aux aciers; ceux-ci se solidifient à une température variable avec la teneur en carbone, température marquée par un point convenable de *Aa*.

Le second cas correspond aux fontes; ces produits se solidifient en deux fois, la température où se termine le phénomène étant la même (1130°) dans tous les cas.

Une fonte contenant plus de 4,3 0/0 de carbone laisse déposer tout d'abord du graphite, s'enrichit en fer et le mélange se solidifie entièrement à 1130°. En dessous de cette température, le surplus de 4,3 0/0 de carbone se sépare de la masse solide et se transforme en carbone graphitique ou *graphite invisible*.

En continuant à laisser le métal se refroidir, il y a lieu de considérer plusieurs cas.

a) Si la teneur en carbone est inférieure à 0,35 0/0, le fer γ se transforme en fer β (point [A_3] (triangle GMO), les cristaux mixtes se conservant intacts dans ce nouvel état du fer. A partir de MO, on observe encore des cristaux mixtes, mais le fer β passe à l'état α (point [A_2]). Enfin, en dessous de PS, les cristaux mixtes se transforment en carbure de fer (cémentite) et c'est cette *combinaison chimique* qui élève la température et produit le phénomène de récalescence. La température diminuant encore, la cémentite cesse de rester uniformément répartie dans la masse. Elle se liquate et se présente en fines lamelles alternant avec des lamelles de fer α.

b) Les phénomènes sont les mêmes pour les teneurs comprises entre 0,35 0/0 de carbone et 0,85 0/0. Le fer γ se transforme cependant directement en fer α en dessous de OS sans passer par l'état β. Les lamelles alternées de fer α et de cémentite constituent la perlite. Cette perlite est répartie plus ou moins uniformément dans la masse principale du fer α. Absente dans le cas du fer pur, la perlite est de plus en plus abondante lorsque la teneur en carbone passe de 0 à 0,85 0/0. A cette teneur de 0,85 0/0, le métal est uniquement constitué par de la perlite. C'est un acier extra-dur, impropre à la construction des dynamos. Le fer α et la cémentite s'étant entièrement liquatés en lamelles alternées, leur mélange est eutectique.

Toute perlite pure ou disséminée contient 0,85 0/0 de carbone. Ce dernier corps peut donc être réparti très inégalement dans la masse d'un métal solidifié.

c) Lorsque la teneur en carbone est comprise entre 0,85 0/0 et 1,6 0/0, les transformations sont plus simples. A une température définie par la ligne SE du diagramme, le mélange de fer γ et de

cristaux mixtes se transforme. Grâce à l'excès de carbone, la cémentite se produit plutôt que précédemment, les cristaux mixtes subsistent.

En dessous de 690°, point [$A_{3.2.1}$], une partie de la cémentite subsiste, une autre se liquate, le fer γ des cristaux mixtes passe à l'état α et l'on obtient finalement un mélange de perlite (fer α et cémentite en lamelles alternées) et de cémentite ne se liquatant pas et subsistant telle quelle. C'est de la *cémentite indépendante*.

d) Les phénomènes sont les mêmes lorsque la teneur en carbone passe de 1,6 0/0 à 6,6 0/0, avec cette différence qu'il existe une transformation intermédiaire de plus.

En dessous de la température eutectique (1130°), le mélange qui s'est brusquement solidifié est composé de cristaux mixtes et de graphite. Entre la température de 1000° et celle de récalescence, il se produit de la cémentite, sa température de dissociation le permettant, car elle est plus élevée en présence d'un excès de carbone que lorsque la teneur est moindre. Les cristaux mixtes subsistent, sauf la portion dont le fer γ s'est précisément combiné au graphite pour fournir de la cémentite.

En dessous de 690°, le mélange se transforme, comme précédemment, en perlite disséminée dans de la cémentite indépendante.

e) Le mélange final, en dessous de 690°, est au contraire constitué par de la cémentite et du graphite si la teneur en carbone est supérieure à 6,6 0/0.

Il y a lieu de noter que, sur le diagramme (fig. 60), les lignes les plus utiles dans la pratique ont été tracées avec une certitude très grande ; elles traduisent de multiples expériences concordantes. Les lignes GO, MO, OS, PS, AB, BD, en particulier, représentent les phénomènes avec beaucoup de rigueur. Ces lignes sont les plus importantes relativement aux aciers.

Il reste à expliquer l'usage du diagramme de Roozeboom, diagramme résumant la doctrine des phases. Soit un métal à 0,18 0/0 de carbone, par exemple, constituant un acier doux de qualité ordinaire pour carcasses magnétiques de dynamos. Traçons l'ordonnée x' y' correspondant à la teneur 0,18. Nous voyons sur le diagramme (fig. 60) que cet acier commence à se solidifier en p à 1580° et que la solidification est terminée en q (1560°). Le mélange solide est formé, à ce moment, de fer γ et de cristaux mixtes ; il subsiste tel quel jusqu'en r (800°). Alors commence la transformation du fer γ en fer β. A 740° s'opère celle du fer β en fer α, les cristaux mixtes subsistant toujours. Enfin, en dessous

de 690°, le métal est formé de fer α (*ferrite*) et du mélange eutectique (ferrite + cémentite = perlite).

Si le métal est refroidi trop rapidement entre 850° et 690°, les transformations peuvent rester fort incomplètes et, dans le mélange froid, on est exposé à rencontrer une certaine quantité de fer γ et de cristaux mixtes. On sait que ces derniers composés sont fort peu magnétiques; leur présence diminue donc la perméabilité du métal.

Si l'on ignore dans quelles conditions le refroidissement s'est opéré, il est toujours facile d'éliminer le fer γ ainsi que les cristaux mixtes. Il suffit, en effet, pour cela, de recuire l'acier et de le maintenir quelque temps à une température convenable, température précisément comprise entre 690° et 740°; on laisse refroidir ensuite très lentement. Il est évident, sur le diagramme, que tout recuit effectué à une température inférieure à 690° est inefficace, le point critique [A] n'étant pas atteint. Quant à la durée du recuit, elle dépend de la masse des pièces; on peut juger de l'efficacité du recuit en analysant au microscope un fragment du métal refroidi, ainsi qu'il sera indiqué plus loin. Cette analyse montre si les constituants sont uniquement composés de ferrite et de perlite (ce qui doit être) ou s'il est resté des constituants non transformés.

En chauffant, par exemple, la pièce au-dessus du point *r* (800°) et en la trempant ensuite dans l'eau froide, l'analyse fait voir qu'il peut y avoir, dans ces conditions, absence presque complète de ferrite et de perlite dans le métal ainsi refroidi brusquement. Un tel métal présenterait de très médiocres qualités magnétiques.

Lorsqu'on réfléchit que toutes les transformations correspondant aux divers points critiques se produisent pendant la solidification dans le moule, pour les carcasses de dynamos coulées en acier doux, on est toujours en droit de se demander si le refroidissement a été assez lent pour permettre le jeu complet des phases. Les fondeurs étant souvent pressés de démouler, on estimera certainement qu'il est intéressant de se rendre compte des résultats du travail de fonderie.

Nous pensons qu'il y aurait souvent intérêt à recuire convenablement les carcasses des dynamos. Rien n'est moins homogène qu'un gros noyau d'électro en acier coulé. Si les parties centrales peuvent être complètement transformées, les parties extérieures risquent souvent de contenir encore une notable proportion de fer γ et de cristaux mixtes. Le flux prévu sera alors fort coûteux à obtenir et l'on pourra malgré tout ne pas avoir la place de loger le cuivre nécessaire pour le produire.



Fig. 61. — Aspect des grains polyédriques de ferrite (Grossissement de 100 diamètres).



Fig. 62. — Cémentite indépendante et perlite (grossissement de 1000 diamètres).

Les noyaux en fer forgé, rapportés sur les culasses, sont bien moins sujets à cet inconvénient que ceux venus de fonte. En effet, il a fallu nécessairement en *réchauffer notablement le métal avant forgeage.*

Ainsi s'expliquerait la préférence marquée des constructeurs de dynamos pour les carcasses en acier coulé avec noyaux polaires forgés et rapportés. Cette préférence est justifiée, en outre, par la présence fréquente de retassures, souvent de grand volume, rencontrées en plein cœur dans les noyaux d'acier coulé et là où l'on escompte que le métal doit être précisément le meilleur, magnétiquement parlant.

Description des constituants des mélanges fer-carbone. — On peut remarquer, d'après la liste déjà donnée de ces constituants, qu'ils ne figurent pas tous dans le diagramme (fig. 60) de Roozeboom.

Les domaines indiqués dans ce diagramme sont donc incomplets et doivent être subdivisés de manière à montrer la place occupée par des constituants dont l'existence n'est pas niable.

C'est ce que M. Roozeboom a essayé de faire, il y a deux ou trois ans, ainsi que M. Le Chatelier. Nous examinerons plus loin le diagramme rendu ainsi plus complet.

1° *Ferrite ou fer à l'état* α (1). — La ferrite se présente sous forme de grains polyédriques lorsqu'on attaque la surface polie d'un acier doux recuit, soit par la teinture d'iode, soit par l'acide nitrique ou l'acide picrique (fig. 61).

Ces grains appartiennent à autant de cristaux cubiques développés, au début de la solidification, autour de centres indépendants. Ces grains, en se rencontrant, se sont mutuellement limités par des facettes plus ou moins planes dont la figure 61 montre les traces sur le plan de la surface polie.

Selon qu'un grain donné est coupé par la face polie de l'échantillon, parallèlement à une face du cube, à l'une de ses arêtes ou suivant une direction quelconque, les figures de corrosion tracées sur ce grain, par l'attaque, montrent des stries parallèles ou un aspect confus. Le grain du milieu montre nettement les corrosions de cristaux cubiques.

2° *Cémentite ou carbure de fer* Fe^3C. — Le nom de cémentite a été donné à ce constituant à cause de la combinaison définie chimiquement que produisent le fer et le carbone. Le carbone,

(1) Les figures 61 à 66 sont extraites de l'ouvrage *Contribution à l'étude des alliages*, publié en 1896-1900 par la Commission des alliages (Société d'encouragement pour l'industrie nationale).

dans la cémentite, existe à un état appelé indifféremment « carbone de cémentation », *carbone de recuit* ou carbone de carbure normal. La cémentite est le plus dur des constituants des mélanges fer-carbone; elle se laisse rayer bien plus difficilement que les autres constituants.

Dans le carbure de fer, le métal peut être remplacé en proportions quelconques par le manganèse, le chrome, le tungstène, etc. On obtient ainsi un carbure double de fer et du métal ajouté. Les métaux précités sont donc entièrement localisés dans le réseau de cémentite ou de perlite.

La cémentite se présente sous deux aspects nettement différents (fig. 62) :

a) Sous forme de lamelles rectilignes relativement épaisses se superposant souvent comme les feuilles d'un ressort à lames. Les groupes de lamelles traversent fréquemment un réseau continu divisant la masse en grains; ils s'isolent aussi à l'intérieur des grains de fer. La cémentite présentant cet aspect se nomme *cémentite indépendante ;*

b) Le carbure se présente d'autres fois en fines lamelles généralement courbes et sensiblement parallèles entre elles dans un même groupe. Ces lamelles sont séparées par d'autres lamelles constituées par de la ferrite.

L'ensemble des lamelles de cémentite et de l'interstratification de ferrite se nomme *perlite*. C'est le mélange eutectique des deux constituants qui la composent.

Le nom de perlite a été choisi pour rappeler l'aspect nacré de la perle, aspect que montrent les lamelles de perlite lorsqu'on les éclaire avec une lumière oblique.

Les irisations ne sont d'ailleurs visibles qu'en lumière blanche. Elles cessent naturellement en lumière monochromatique.

Sur la figure 67, la cémentite indépendante fait penser à une sorte de ruisseau traversant de haut en bas la microphotographie. Les lamelles noires sont le carbure Fe^3C de la perlite et les interstratifications de ferrite sont nettement visibles en clair entre les lamelles noires.

D'après le diagramme (fig. 60), on ne trouve de cémentite indépendante que dans les aciers dont la teneur en carbone dépasse 0,9 0/0. A la teneur de 0,85 0/0, la perlite existe seule; la perlite est mélangée aux grains polyédriques de ferrite dans les aciers doux.

3° *Sorbite*. — Ce nom, donné en l'honneur du savant anglais Sorby, s'applique à un constituant dont l'aspect serait celui d'une perlite non résolvable en lamelles, aux plus forts grossissements (fig. 63).



Fig. 63. — Sorbite et perlite (grossissement de 1500 diamètres).

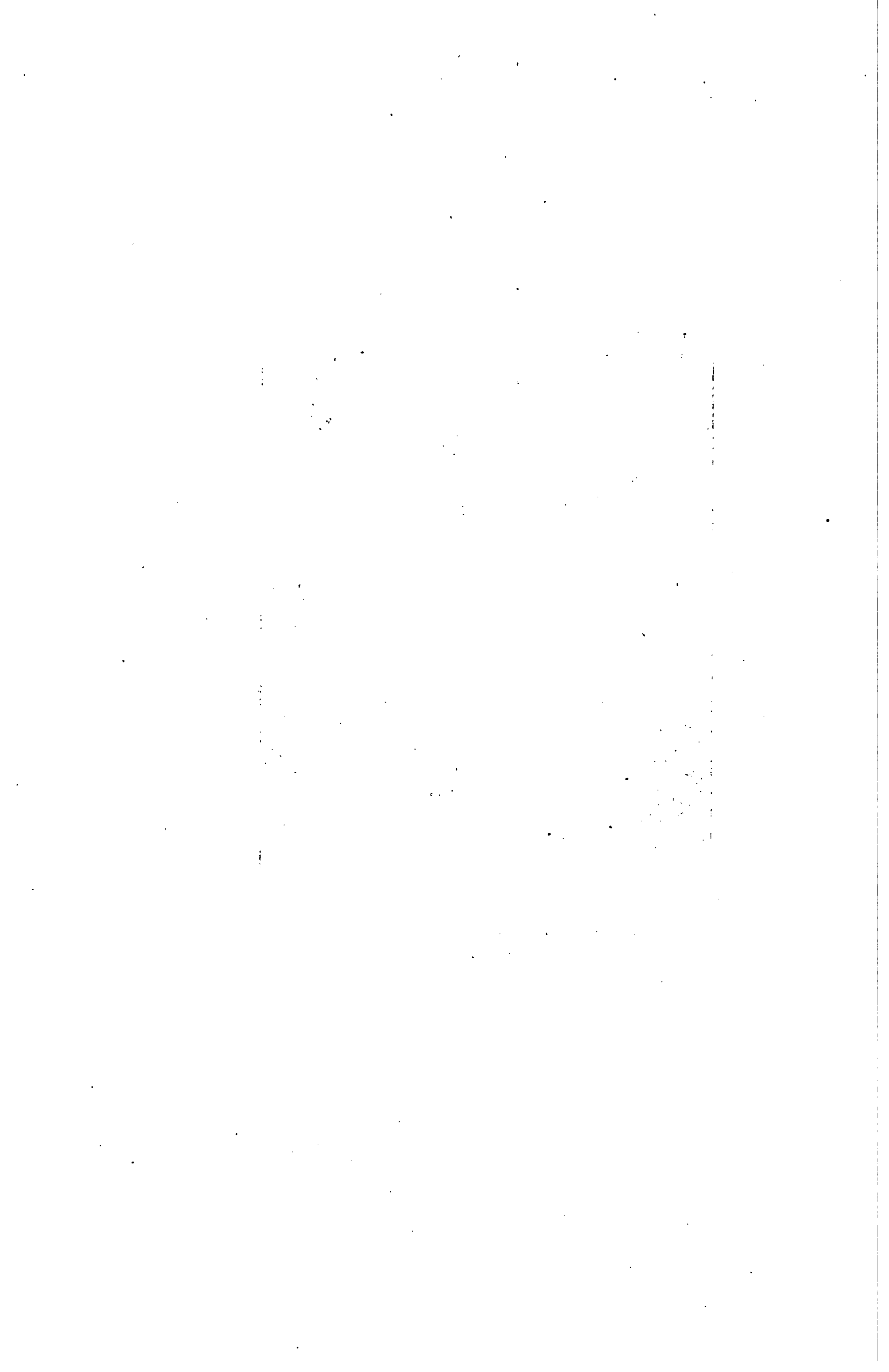




Fig. 64. — Martensite (grossissement de 1000 diamètres)

La partie inférieure de la figure 63 montre de la perlite et la partie supérieure, plus sombre, représente la sorbite. On suppose avec raison que la sorbite est de la perlite n'ayant pu se séparer en lamelles (se liquater), à cause d'un refroidissement trop brusque. La sorbite contient probablement un peu plus de carbone que la perlite.

La sorbite caractérise la trempe dite *négative;* on la produit en chauffant l'acier vers 750°, au-dessus du point critique [A] et en hâtant le refroidissement sans aller jusqu'à la trempe.

La perlite se transforme ainsi en sorbite, tout au moins, en grande partie.

Le caractère qui distingue nettement la sorbite de la perlite est son aspect granuleux et l'impossibilité de la résoudre en lamelles lorsqu'on l'observe aux plus forts grossissements (1200 à 1500 diamètres).

4° *Martensite.* — Le nom de ce constituant indique qu'il est dédié au professeur allemand Martens. La martensite est une solution solide de carbone dans du fer γ; on ne peut donc la trouver dans les aciers recuits dont le fer à l'état γ, à haute température, s'est transformé en fer α par refroidissement lent ou par recuit.

La figure 64 montre la structure de la martensite; elle se présente sous forme de fibres rectilignes orientées parallèlement et séparées ou non par un remplissage grenu ou vermiculé. On observe très souvent un triple système de fibres, respectivement parallèles aux trois côtés d'un triangle. Ces systèmes, très caractéristiques de la martensite, se recoupent fréquemment dans une même région. Les fibres de martensite sont d'autant plus longues que la teneur en carbone est plus faible (0,45 0/0 de carbone, grossissement 1000 diamètres, fig. 64). Avec un acier à aimant, les fibres n'auraient que quelques millimètres sur une photomicrographie au même grossissement de 1000 diamètres.

D'après ce qui a été dit, la martensite caractérise les aciers trempés puisqu'il faut avoir arrêté les transformations du fer γ par la trempe, pour obtenir la solution de carbone dans cet état du fer, à la température ordinaire.

Les aciers à moins 0,35 0/0 de carbone doivent être trempés au-dessus de 850°. Ceux dont la teneur est plus élevée peuvent se tremper au dessus de 740°. Cela résulte du diagramme de Roozeboom.

5° *Troostite.* — Ce constituant, dédié à M. Troost, chimiste français, s'obtient en trempant l'acier lorqu'il se trouve dans l'intervalle critique (entre $[A_2]$ et $[A_1]$).

On chauffe le métal à 850°, par exemple, on laisse refroidir lentement jusqu'à 690° et l'on trempe à cette température dans de l'eau à 10° ou 15°. La troostite, décelée par des réactifs appropriés, forme des marbrures irrégulières (fig. 65).

Le remplissage est formé de martensite et de fer α. L'acier chauffé au-dessus de 850° et trempé à l'huile ou dans l'eau bouillante, donne également de la troostite. La troostite existe rarement dans les aciers du commerce, ceux-ci étant recuits ou trempés trop énergiquement. L'échantillon que montre la figure 70 contenait 0,45 0/0 de carbone.

6° *Austenite.* — Ainsi nommé, en l'honneur du savant anglais Roberts Austen, ce constituant s'obtient en chauffant les aciers durs (plus de 1,10 0/0 de carbone) au-dessus de 1000° et trempant dans un mélange réfrigérant.

L'échantillon poli et placé quelques minutes dans de l'air liquide laisse alors apparaître spontanément l'austenite qui ressort de la surface polie et paraît en relief. La figure 66 montre l'aspect de l'austenite; dans ce constituant, le fer est maintenu à l'état γ.

Elle se présente, comme on le voit, sous forme de parallélogrammes clairs dont les bords sont peu réguliers, entourés du constituant qu'on va décrire ci-après.

L'austenite est beaucoup moins dure que la martensite; elle se laisse facilement rayer par une aiguille à coudre dont on a recuit la pointe, c'est-à-dire dont la pointe a repris la teinte bleue. La figure 66 représente un échantillon contenant 1,1 0/0 de carbone; il a été attaqué par l'acide chlorhydrique et l'on voit la rayure produite par une aiguille, rayure qui arrive jusqu'au milieu d'un des plus grands parallélogrammes d'austenite.

Le remplissage foncé entre les parallélogrammes est constitué par de l'*hardenite*.

L'austenite, bien qu'obtenue par une trempe très vive, est relativement tendre et beaucoup moins dure, en tout cas, que la martensite; le fer s'y trouve à l'état γ. Dans les aciers ne contenant que du fer et du carbone, l'austenite n'existe jamais sans être accompagnée de martensite.

Dans l'acier à 1,1 0/0 de carbone, la proportion d'austenite est presque nulle; elle augmente avec la richesse en carbone; pour le métal à 1,8 0/0 de carbone (limite des aciers forgeables), on en trouve jusque 70 0/0, d'après M. Osmond. Cette proportion de 70 0/0 n'a jamais pu être dépassée. Un métal contenant plus de 1,8 0/0 de carbone fournit 70 0/0 d'austenite et l'excédent de carbone se sépare sous forme de cémentite.



Fig. 65. — Troostite (grossissement de 1000 diamètres).



Fig. 66. — Austenite (parallélogrammes clairs) et hardenite (entourages en fer de lance) grossissement de 1000 diamètres).

On observera donc toujours des mélanges d'austenite et de martensite ou d'austenite et de hardenite.

La martensite est magnétique, mais beaucoup moins que le fer α.

7° *Hardenite.* — Le dernier constituant actuellement défini avec certitude est l'hardenite. La figure 66 la montre sous forme de filets barbelés rappelant des fers de lance, filets séparant les parallélogrammes d'austenite.

L'hardenite est une solution solide et *saturée* de carbone dans le fer γ; ce serait de la martensite saturée. Obtenue en même temps que l'austenite, elle remplace la martensite dans le mélange.

Il y a lieu de noter, en effet, que si l'on rencontre le mélange austenite-martensite, on n'observe jamais le mélange hardenite-martensite. C'est M. Osmond qui a, le premier, démontré l'existence des constituants qu'on vient de décrire. C'est lui aussi qui leur a donné leurs noms.

Graphite. — Le graphite n'est pas un constituant proprement dit. Il se dépose dans les fontes très riches en carbone (plus de 6,6 0/0) et l'on ne doit en trouver dans un métal recuit que si sa teneur en carbone est supérieure à 6,6 0/0.

Cependant, on peut observer du graphite dans les mélanges fer-carbone dont la teneur varie de 1,6 à 7 0/0 lorsqu'on les trempe au-dessus de 1000° dans l'eau froide. La présence du graphite dans ces conditions dénote un métal mal travaillé.

Le graphite forme alors des inclusions noires.

L'acier à 0,85 0/0 de carbone étant un mélange eutectique, on nomme *hypoeutectiques* ceux dont la teneur en carbone est moindre. Les aciers à plus de 0,85 0/0 de carbone sont appelés, par contre, mélanges *hypereutectiques.*

Solidification des mélanges fer-carbone. — Quand le mélange liquide se refroidit, il commence à laisser déposer des cristaux répartis dans toute la masse et noyés dans le liquide-mère. Ces cristaux, dont la température de fusion est évidemment plus élevée que celle du liquide-mère, forment un dépôt appelé dépôt de *première consolidation.*

Le dépôt de *seconde consolidation* résulte de la solidification du liquide-mère. Ce dernier dépôt vient donc boucher les interstices existant dans le dépôt de première consolidation.

Autres états supposés du fer. — Diverses considérations, sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre ici, autorisent à penser que le fer existe encore sous des états différents des formes γ, β, α.

L'état δ est presque certain; il serait stable au-dessus de 1300° (point de Ball).

Un autre état, non encore qualifié, serait stable entre 650° et 740°, mais la question n'est pas tranchée définitivement. Nous n'insisterons donc pas davantage sur ces états dont l'existence ne sera démontrée que par de nouvelles recherches.

Diagramme de Roozeboom complété. — On a vu que plusieurs des constituants dont nous avons parlé ne figurent pas sur le diagramme (fig. 60). M. Roozeboom a complété son diagramme primitif en y faisant rentrer respectivement chacun des constituants aux emplacements que les expériences paraissent devoir

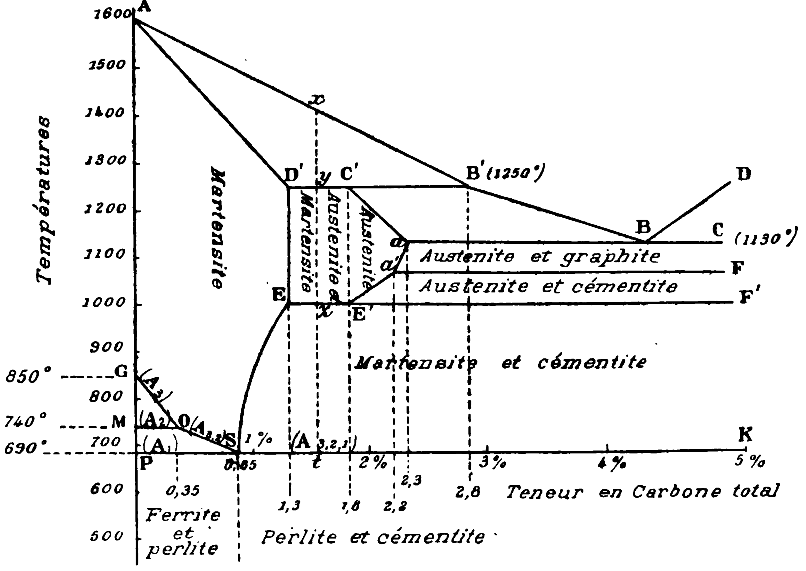


Fig. 67. — Diagramme de Roozeboom complété.

le mieux fixer. La figure 67 représente le diagramme ainsi complété; il a été limité aux teneurs comprises entre 0 et 4,5 0/0 de carbone, le diagramme primitif n'étant pas modifié pour les teneurs plus élevées.

La ligne AB (fig. 60) est maintenant brisée en B' (fig. 67) vers le point 1250°. La solidification donnerait alors des cristaux mixtes passant de la martensite à l'austenite.

Les mélanges à teneur variant de 0 à 2,8 0/0 de carbone donneraient de la martensite contenant de 0 à 1,3 0/0 de carbone, en se solidifiant aux températures comprises entre 1600° et 1250°, suivant la teneur (ligne AD'). Pour les teneurs de 2,8 à 4,3 0/0 de carbone, on aurait de l'austenite contenant de 1,8 à 2,3 0/0 environ de carbone.

Prenons, par exemple, le mélange à 1,5 0/0 de carbone. Il fond en x (1420°); de x à y, il existe des cristaux mixtes (carbone dissous dans le fer γ). De y à z, les cristaux mixtes se transforment en un mélange de martensite et d'austenite. Ce mélange laisse à son tour déposer de la cémentite en dessous de 1000° (point z) et l'austenite disparaît.

Enfin, au-dessous de 680° (point t), le mélange est formé de cémentite indépendante et de perlite.

Dans les diagrammes de Roozeboom, les plages correspondant aux divers constituants existant ensemble ou séparément se nomment des *domaines*. On dira (fig. 60) que AD'ESOG est le domaine de la martensite. Les données expérimentales manquent encore pour introduire sûrement les autres constituants dans le diagramme; ces constituants sont, d'ailleurs, des formes de transition.

Recherche des constituants dans les mélanges fer-carbone à la température ordinaire. — Cette recherche constitue l'analyse micrographique du métal ou métallographie. Elle s'effectue à l'aide du microscope, la surface à observer étant polie puis attaquée, au besoin, par différents réactifs. Le polissage est rendu nécessaire pour permettre des observations à un fort grossissement. La mise au point simultanée des diverses parties de la portion de surface examinée n'est possible qu'à la condition que chacune de ces parties soit contenue dans un même plan. Cette nécessité découle immédiatement de ce que le foyer est très court dans les objectifs de microscopes L'image ne peut alors être plane (tous ses points nettement visibles simultanément) que si l'objet est lui-même rigoureusement plan, c'est-à-dire absolument poli.

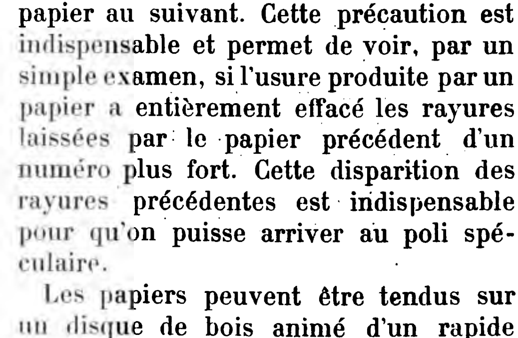
Comme la surface polie doit être normale à l'axe optique du microscope, celui-ci ne peut recevoir de rayons qui proviendraient de rayons obliques. L'échantillon doit donc être éclairé perpendiculairement à la surface polie observée, sous peine de ne pas envoyer de rayons lumineux dans le microscope.

Nous décrirons ci-après la méthode de polissage des échantillons fer-carbone, puis le dispositif expérimental d'éclairage vertical des microscopes et nous procéderons à l'examen des réactifs à employer pour distinguer les constituants les uns des autres.

Polissage. — L'échantillon est découpé, dans le métal à étudier, à la lime, à la scie à métaux ou à la meule d'émeri, suivant sa dureté et suivant l'outillage dont on dispose. Dans le cas des fontes, on peut utiliser le marteau et le burin pour enlever un fragment convenable.

Dans tous les cas, la surface destinée à être polie est dressée à la lime, à la meule ou sur un plan d'émeri aggloméré.

On continue en frottant l'échantillon sur des papiers d'émeri de plus en plus fins, jusques et y compris le papier du commerce marqué 0000.



On a soin de croiser les traits ou rayures lorsqu'on passe d'un papier au suivant. Cette précaution est indispensable et permet de voir, par un simple examen, si l'usure produite par un papier a entièrement effacé les rayures laissées par le papier précédent d'un numéro plus fort. Cette disparition des rayures précédentes est indispensable pour qu'on puisse arriver au poli spéculaire.



Fig. 68. — Machine à polir.

Les papiers peuvent être tendus sur un disque de bois animé d'un rapide mouvement de rotation. A cet effet, il est commode d'employer une petite machine telle que celle que représente la figure 68.

Les axes de cette machine sont munis de roulements à billes et l'on peut obtenir pour le disque, sans fatigue pour l'opérateur, une vitesse angulaire de 1500 tours par minute. Lorsqu'on ne dispose pas d'une machine à polir, on peut simplement frotter les échantillons sur les divers papiers d'émeri. Il est alors nécessaire de poser les papiers d'émeri sur une glace bien plane.

Il est commode de donner aux échantillons la forme de plaquettes ou de rondelles de 2 à 3 cm² de surface, les deux faces principales étant parallèles et l'épaisseur de la plaquette étant de 5 à 6 mm.

Il est mauvais de découper les échantillons sur le tour avec un outil à saigner. L'outil mate et refoule la matière et les rondelles les mieux polies montrent toujours la trace de l'outil, à moins que l'on n'use ensuite notablement la surface.

Après le passage sur le papier 0000, la plaquette est loin d'être

polie suffisamment; il faut arriver, en effet, au poli spéculaire, c'est-à-dire qu'il ne doit plus exister de rayures visibles au microscope.

Pour continuer le polissage, il est nécessaire de préparer soi-même des produits à polir que l'on ne trouve pas dans le commerce.

L'alumine, provenant de la calcination du sulfate double d'alumine et d'ammoniaque (alun d'ammoniaque), est le corps le plus actif et celui dont on a tout avantage à se servir; on trouve l'alumine à bas prix dans le commerce, mais il faut la traiter.

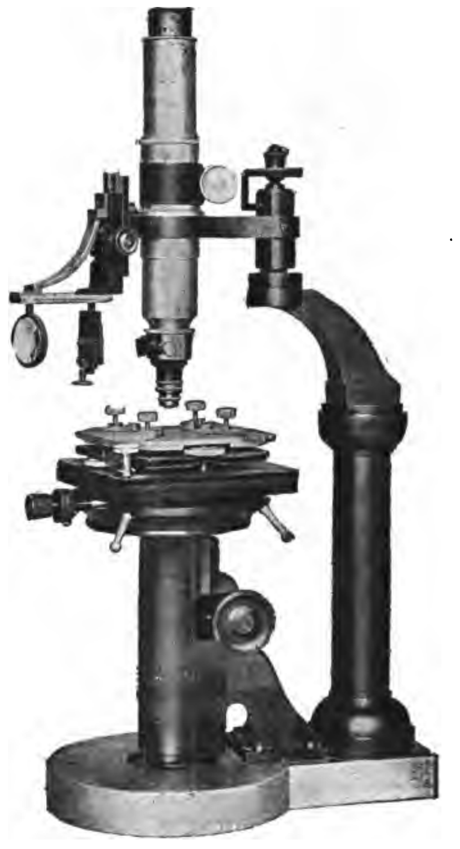


Fig. 69. — Microscope Nachet.

Pour cela, on délaye l'alumine avec de l'eau, dans un mortier de porcelaine, et on l'agite dans un grand bocal. Il est nécessaire d'employer de l'eau distillée; l'eau ordinaire, toujours calcaire, produisant, en effet, la réunion des grains d'alumine en grumeaux.

On traite 100 gr d'alumine dans 5 litres d'eau à laquelle on ajoute $\frac{1}{1000}$ d'acide azotique.

Après plusieurs lavages, on ajoute 2 cm^3 d'ammoniaque par litre, ce qui aide l'alumine à rester en suspension.

On décante le liquide trouble après 15 minutes de repos.

Ce liquide est mis de côté pour subir des classements ultérieurs, obtenus de la même manière, en décantant les dépôts successivement après 1 heure, 4 heures et 16 heures.

Avec le dépôt obtenu après 15 minutes, on prépare des papiers comme les papiers d'émeri du commerce. Pour cela, l'alumine, dite de 15 minutes, est délayée dans du blanc d'œuf

et étalée au pinceau sur du papier bien couché et à grain fin.

Ce papier sert à continuer le polissage comme précédemment.

Pour terminer le polissage, on utilise successivement les dépôts d'alumine dits de 1 heure, de 4 heures et rarement ceux de 16 heures pour les aciers. A cet effet, on se procure une meule en feutre ou une plaque de cette matière; on y étale le dépôt qu'on humecte d'eau de savon et on achève le polissage sur feutre soit à la machine, soit à la main. Les rayures les plus fines disparaissent assez rapidement et l'on arrive au poli spéculaire voulu.

Lorsque les aciers sont très doux, il est quelquefois nécessaire de faire usage du dépôt de 16 heures employé sur un morceau de velours humide et tendu sur une feuille de verre. Si la surface à polir présente des trous ou piqûres, il faut préalablement les boucher avec de la gomme laque.



Fig. 70. — Appareil d'éclairage vertical pour microscope Nachet.

Microscope et son éclairage vertical. — Les microscopes ordinaires peuvent être employés.

Il est nécessaire de disposer d'objectifs et d'oculaires dont les combinaisons permettent l'obtention de grossissements pouvant commencer à 50 diamètres et atteindre 1000 ou 1500 diamètres. Il faut aussi posséder l'appareil d'éclairage vertical.

Le modèle de microscope (fig. 69), construit par la maison Nachet, répond tout spécialement aux conditions voulues.

La platine est particulièrement robuste et peut supporter des échantillons pesant plus de 1 kg.

Un chariot double permet de déplacer l'objet suivant deux directions perpendiculaires, de manière que tous ses points puissent être amenés successivement dans le champ de l'objectif. Des vis calantes servent à rendre la surface polie rigoureusement perpendiculaire à l'axe optique de l'instrument.

L'éclairage vertical est disposé à la partie inférieure du tube du microscope qu'il sépare de l'objectif. Une lentille, suivie d'une cuve à liquide coloré, sert à faire pénétrer horizontalement un pinceau de lumière dans le système d'éclairage à prisme. La lumière doit être vive; celle d'une lampe à incan-

descence poussée convient particulièrement bien; avec des liquides convenables, on obtient une lumière monochromatique utile pour éviter toute irrisation aux très forts grossissements.

La mise au point s'effectue par un mouvement rapide à crémaillère, puis par un mouvement lent que commande la vis micrométrique située au-dessus de la potence surmontant la colonne de droite.

L'appareil d'éclairage vertical se compose (fig. 70) d'un prisme

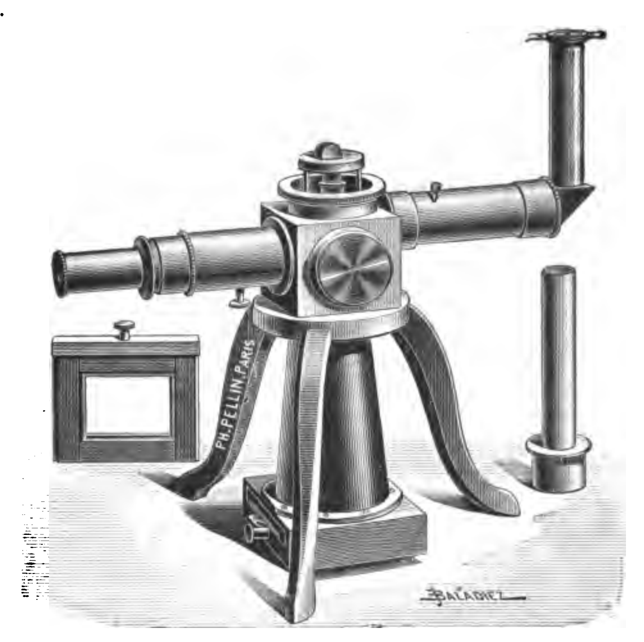


Fig. 71. — Microscope Le Châtelier pour métallographie.

à réflexion totale *P* que l'on peut incliner plus ou moins, en tournant le bouton moletté B, et amener en avant ou en arrière par la manœuvre du bouton C. Le rayon lumineux pénètre par le diaphragme V, rencontre le prisme normalement à une face taillée en lentille convexe et se réfléchit sur la face inclinée à 45° pour venir rencontrer verticalement la surface polie à examiner.

L'objectif, traversé de haut en bas par la lumière, concentre celle-ci sur l'échantillon et joue le rôle de condensateur.

La surface polie renvoie de bas en haut les rayons qui traversent de nouveau l'objectif et viennent former l'image à la partie supérieure du microscope.

Le réglage de l'éclairage à prisme demande un peu d'habitude;

on arrive rapidement à un bon résultat en mettant préalablement au point un morceau de papier blanc posé provisoirement sur l'échantillon, après avoir repoussé le prisme P en avant. On rentre alors ce prisme et, manœuvrant simultanément les boutons B et C, on constate rapidement que l'éclairage de la surface polie est satisfaisant.

L'arête inférieure de la face à 45° du prisme doit alors obturer tout au plus la moitié du champ visible, lorsqu'on regarde dans le microscope après en avoir enlevé l'oculaire.

Tout l'artifice consiste donc à avoir mis l'objet très sensiblement au point avant de chercher à régler le prisme P. La monture du prisme peut d'ailleurs tourner sur elle-même de façon à orienter le diaphragme V du côté de la source lumineuse.

Le tableau ci-dessous fait connaître les grossissements obtenus avec les objectifs et oculaires les plus souvent utilisés.

	Objectifs.					
Oculaires.	N° 2.	N° 3.	N° 5.	N° 7.	N° 1/12	Grossissements en diamètres.
N° 1	30	70	180	360	600	
N° 2	40	90	260	650	800	
N° 3	60	125	350	780	1100	
N° 4	—	150	425	890	1250	

L'objectif $\frac{1}{12}$ s'emploie en interposant une goutte d'huile de cèdre entre l'objet et la lentille inférieure de l'objectif. L'huile de cèdre ayant le même indice de réfraction que le verre, on élimine ainsi les phénomènes de réfraction dans l'air, dont les effets seraient désastreux étant donné le très fort grossissement de cet objectif. Ce procédé d'élimination de la dispersion fait appeler ce genre d'objectif objectif à *immersion homogène.*

La figure 71 représente le modèle de microscope imaginé par M. Le Châtelier pour les observations métallographiques.

La source lumineuse est placée devant le diaphragme M (fig. 72),

l'objet à examiner est disposé en A, face polie tournée *en dessous*. A la partie inférieure de l'instrument se trouve une chambre noire permettant de photographier l'image amplifiée fournie par l'objectif. Pour les observations on regarde par l'oculaire monté dans le tube à crémaillère H. L'éclairage vertical est obtenu par le prisme à réflexion totale J.

Pour photographier on éloigne le tube à crémaillère de façon à empêcher le prisme E de masquer l'objectif D.

L'appareil figure 69 permet également de photographier. Il

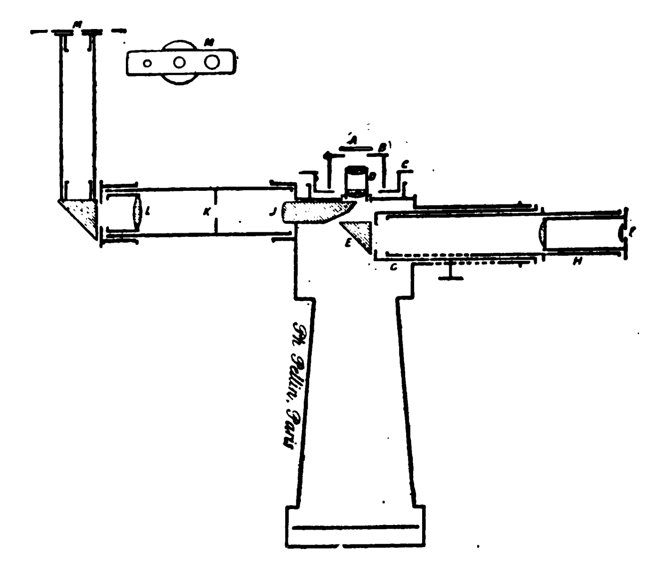


Fig. 72. — Coupe du microscope Le Châtelier.

LEGENDE :

A métal examiné.
B support.
C vis de mise au point.
D objectif.
E prisme à réflexion totale.
F oculaire.
G tube mobile porte prisme.
H tube divisé portant l'oculaire.
J prisme-lentille éclaireur.
K diaphragme vis.
L lentille.
M diaphragme.

suffit pour cela de lui adjoindre une chambre noire spécialement disposée à cet effet (fig. 73).

Marche de la recherche des constituants. — 1° *Polissage en bas relief.* — La plaquette de métal ayant été amenée au poli spéculaire, on lui fait subir l'opération du polissage en bas relief.

A cet effet on mouille une feuille de parchemin et on la tend, côté chair, sur une glace.

On y dépose une pincée de rouge d'Angleterre le plus fin,

obtenu par calcination de l'oxalate ferreux, et on fait pénétrer cette poudre dans le parchemin en le frottant fortement avec le doigt. Le parchemin est ensuite placé sous un filet d'eau et brossé avec une brosse dure, de façon qu'il ne reste que des grains extrêmement fins ayant pénétré dans le parchemin.

Celui-ci, ainsi préparé, est appelé *parchemin rougi* par M. Osmond.

Le polissage en bas relief consiste à frotter la surface polie sur le parchemin rougi et légèrement humecté. Grâce à l'emploi de ce substratum relativement tendre, les constituants les plus mous du métal se creusent les premiers sous l'action de la poudre à polir, et les constituants les plus durs finissent par ressortir en relief, ce qui permet de les distinguer au microscope muni, naturellement, de l'éclaireur vertical.

Sous l'influence du polissage en bas relief, la ferrite garde d'abord le poli spéculaire puis, si on prolonge l'opération, elle finit par se granuler et se résoudre en grains polyédriques dont les uns sont légèrement en saillie, les autres étant en creux par rapport au niveau moyen de la surface.

La cémentite indépendante vient en relief si elle n'est pas disséminée en parties trop fines. La perlite apparaît assez facilement.

La martensite se montre, mais faiblement.

L'austenite apparaît, mais, malgré sa grande résistance à l'usure, on n'arrive pas à la différencier nettement d'avec l'hardenite. Les résultats sont au contraire très nets si l'on immerge la plaquette dans de l'air liquide. A la très basse température de ce liquide, l'austenite augmente de volume et devient nettement visible.

2° *Polissage-attaque.* — Cette opération suit le polissage en bas relief et s'effectue de la même manière sur le parchemin rougi ou frotté de sulfate de chaux précipité, mais le parchemin doit être humecté avec quelques gouttes d'une solution à 2 0/0 de nitrate d'ammoniaque et lavé ensuite à grande eau.

Sous l'influence du polissage-attaque, la ferrite se comporte de la même manière qu'en présence du polissage en bas relief, mais les résultats sont beaucoup plus rapides.

La cémentite n'est pas colorée..

La sorbite se colore rapidement et prend les teintes dites du *revenu* à l'air.

La martensite se développe bien et montre en faible creux les groupes d'aiguilles parallèles aux trois côtés d'un triangle. La coloration est nulle ou quelquefois jaune pâle.

Les liserés de la troostite se colorent en jaune, brun, bleu ou noir.

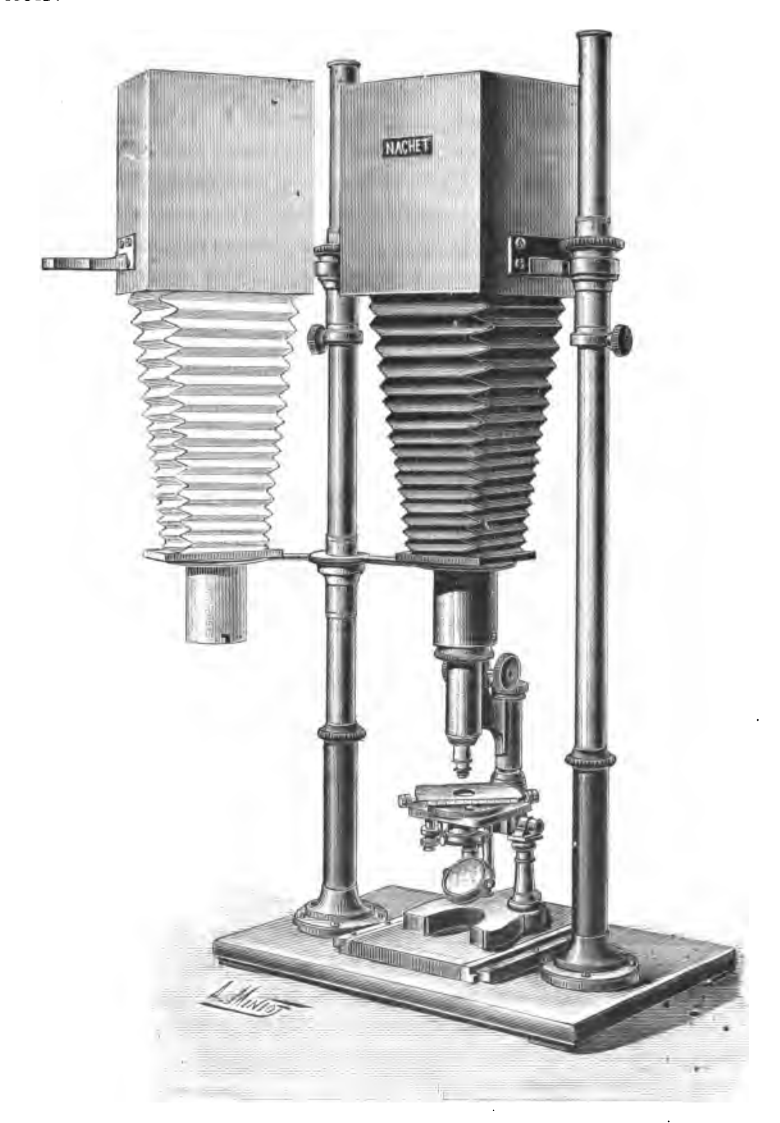


Fig. 73. — Microscope Nachet avec chambre noire pour photographie.

L'austenite se creuse un peu à la longue, mais ne se colore pas.

3° *Attaque chimique.* — Après l'examen de l'échantillon par le polissage-attaque, on repolit soigneusement la surface, en

repassant l'échantillon sur le feutre enduit de savon et d'alumine de 5 ou de 16 heures.

Attaque par l'iode. — On verse une goutte de teinture d'iode officinale sur la surface polie; la décoloration de l'iode est extrêmement rapide. On lave à l'alcool et on sèche. Au besoin on recommence plusieurs fois l'application de la teinture, la première goutte ne produisant généralement que des effets incomplets. Quand il s'agit d'aciers riches en carbone, l'iode colore les constituants dès la première goutte. Il vaut alors mieux étendre la teinture d'iode de deux à trois fois son volume d'alcool à 90°. On verse alors la goutte d'iode et on frotte avec le doigt afin de régulariser l'attaque.

La ferrite se résout en grains polyédriques ne se colorant pas ou très faiblement en jaune pâle.

La cémentite et la perlite ne se colorent pas.

La sorbite, qui n'est pas résoluble aux plus forts grossissements, se colore rapidement.

La troostite se colore, mais plus lentement que la sorbite.

La martensite et l'austenite se colorent simultanément, mais bien après la sorbite et la troostite.

Il faut plusieurs applications d'iode pour y parvenir.

Attaque par l'acide picrique. — On fait usage d'une solution à 5 0/0 d'acide picrique dans l'alcool à 90°.

La ferrite et la cémentite indépendante ne se colorent pas ; le réseau polyédrique se dessine.

La perlite ou cémentite liquatée se colore.

La coloration est très intense pour la sorbite et la troostite ; les aiguilles de la martensite apparaissent nettement.

Attaque par le picrate de soude. — On emploie une solution de picrate de soude à 25 0/0 dans la soude caustique et on opère à l'ébullition.

La cémentite indépendante est seule colorée.

Ce réactif est utile pour reconnaître si un acier recuit contient moins de 0,85 0/0 de carbone. Un tel acier, comme nous l'avons dit, ne doit pas contenir de cémentite indépendante et présenter seulement de la ferrite et de la perlite.

Le picrate de soude en solution sodique est avantageusement remplacé par le picrate de naphtaline. Les solutions bouillantes de ces picrates ne peuvent détonner.

Attaque par le bitartrate de potasse. — Une solution aqueuse de ce sel communique une couleur brun sale à la ferrite et ne colore ni la perlite ni la cémentite.

Solution à 50 0/0 de soude mélangée à volumes égaux avec

une solution à 10 0/0 de nitrate de plomb. — Ces deux solutions ne doivent être mélangées *qu'au moment de s'en servir.* La cémentite est vivement colorée; les carbures et les siliciures sont rapidement attaqués.

Ce réactif s'emploie principalement lorsque le métal étudié est très carburé.

Solution à 10 0/0 de gaz chlorhydrique dans l'alcool absolu. — Ce réactif, additionné de 5 0/0 de chlorure cuivrique, est précieux pour caractériser les aciers recuits en général ainsi que les aciers trempés contenant 1 0/0 de carbone.

La ferrite et la cémentite ne se colorent pas.

La martensite se colore légèrement.

L'austenite se colore davantage.

La sorbite et la troostite se colorent très fortement.

Acide nitrique à 20 0/0 d'eau. — On attaque pendant 30 à 40 secondes; l'attaque peut durer plus longtemps si l'acide pur employé est étendu de 98 volumes d'eau.

Les grains de ferrite se dessinent très bien et ne se colorent que peu ou pas.

La cémentite ne se colore pas, mais la variété dite indépendante paraît souvent moins claire que la ferrite.

Une attaque avec un acide concentré, agissant seulement pendant quelques secondes, donne souvent les meilleurs résultats.

Attaque électrolytique. — L'échantillon poli sert d'anode dans un bain constitué par une solution chaude et assez concentrée d'hyposulfite de soude. On limite le courant à une densité variant de 0,001 à 0,01 ampère par cm^2.

Ce traitement fournit les mêmes résultats que le polissage-attaque, mais ne réussit pas toujours complètement avec les aciers. C'est avec les bronzes qu'il donne les meilleurs effets.

Déformation mécanique. — On serre l'échantillon dans un étau ou bien on le frappe d'un coup de marteau. Les efforts doivent être dirigés dans un plan parallèle à la section polie de façon que celle-ci ne soit pas directement détériorée. La surface polie devient alors mate et l'on fait ainsi apparaître instantanément certains constituants que le polissage en bas-relief isole assez lentement.

Il serait intéressant d'opérer à l'étau tout en observant au microscope en disposant convenablement ce dernier.

On arriverait ainsi à faire apparaître les constituants aussi progressivement qu'on le voudrait.

Cette méthode, moins certaine que l'emploi des réactifs, quant

à présent, est à l'étude et pourra peut-être devenir la meilleure de toutes.

Interprétation des observations. — La détermination exacte des constituants n'est pas toujours aussi simple qu'on pourrait le supposer, et une certaine éducation de l'œil est nécessaire pour bien reconnaître les formes dont nous avons donné la description.

Il est généralement facile de reconnaître un constituant isolé, mais le problème se complique lorsque plusieurs existent simultanément. Le plus souvent, on rencontre deux constituants coexistants; il n'est même pas très rare d'en rencontrer trois, mais c'est le maximum.

Pour aider à l'appréciation de ces cas plus complexes, il est utile de se rappeler que la sorbite accompagne la ferrite et la perlite. La sorbite ne serait même que le début de la liquation, dont le résultat final serait la perlite.

La troostite existe souvent avec la martensite; ces constituants caractérisent les aciers trempés.

Application aux métaux magnétiques. — Les métaux magnétiques employés dans les constructions électriques comprennent : les aciers doux, les fers forgés, les fontes et les aciers durs, ces derniers étant plus spécialement destinés à la construction des aimants permanents.

Les aciers forgés et les aciers doux coulés sont utilisés pour fondre les carcasses magnétiques des dynamos. A l'état de tôles, les aciers doux sont réservés pour la construction des noyaux d'induits et de transformateurs.

Ces métaux doivent toujours avoir été refroidis assez lentement, ou recuits à température suffisante (au-dessus de 850°) pour que le métal ait subi toutes les transformations nécessaires.

Les fers forgés et aciers doux doivent donc présenter les caractères suivants :

Abondance de ferrite avec grains polyédriques très développés; peu de perlite, celle-ci étant localisée dans les joints des grains; absence des autres constituants. L'austenite, qui n'est pas magnétique, ne doit jamais s'y rencontrer. La cémentite indépendante indiquerait un excès de carbone et la martensite, bien qu'ayant une perméabilité notablement supérieure à l'unité, serait l'indice d'un refroidissement trop rapide ou d'un recuit insuffisant.

La grosseur des grains de ferrite est un renseignement précieux. On sait, en effet, que le nickel se dissout dans la ferrite en abaissant la perméabilité. La présence du nickel réduit de

beaucoup les dimensions des polyèdres de ferrite. Au contraire, la présence favorable du silicium et de l'aluminium se traduit par une augmentation prodigieuse de la grosseur des grains de ferrite.

Les fontes magnétiques ne doivent présenter ni graphite ni martensite. La perlite et la cémentite indépendante doivent seules exister.

Enfin, dans les aciers pour aimants, on doit, avant la trempe, trouver des grains de ferrite très petits. Si la trempe a été effectuée à température suffisante, on rencontrera principalement de la martensite formant des triangles de très petites dimensions à cause de la forte teneur en carbone; la présence de perlite en notable quantité prouverait une trempe incomplète. *Il faut dépasser 850°.*

Conclusion. — L'étude métallographique des produits magnétiques sidérurgiques est arrivée à un état assez avancé pour que les électriciens s'y intéressent et s'adressent à elle afin d'y rechercher les indications précieuses que l'on peut en tirer. Cette étude renseigne particulièrement sur les traitements thermiques subis par les pièces livrées au constructeur. Le traitement thermique a une importance capitale et nous espérons avoir pu contribuer à répandre la confiance que mérite la métallographie des fers et aciers, en résumant l'état de la question, tout au moins dans ses grandes lignes.

***

Composition chimique de quelques aciers pour aimants permanents.

Aciers d'Allevard au tungstène.

Tungstène.	5,84 0/0
Carbone.	0,59 0/0
Silicium.	0,09 0/0
Manganèse.	0,58 0/0

Aciers au molybdène (Chatillon et Commentry).

Molybdène.	4,05 0/0
Carbone.	1,24 0/0
Silicium.	0,03 0/0
Manganèse.	0,22 0/0

Aciers au chrome d'Assailly.

Chrome.	2,831 0/0
Carbone.	0,819 0/0
Silicium.	0,274 0/0
Manganèse.	0,210 0/0

Ces aciers font partie des remarquables échantillons étudiés si magistralement par Mme Curie au point de vue de leur emploi pour la fabrication des aimants permanents. Les résultats de cette étude ont été publiés dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale;* ils sont extrêmement intéressants à consulter et renseignent d'uue façon très complète sur les procédés de trempe les plus efficaces.

ERRATA

Page 10, ligne 23, lire : **0, 1** au lieu de 0, 6, les deux fois dans la même ligne.

Page 10, ligne 27, lire 0, 18 au lieu de 0, 9.

Page 12, ligne 32, lire... des éléments du métal. *Il en est de même du procédé qui consiste à rayer la surface polie avec des corps de dureté connue;* c'est la méthode sclérométrique.

Ajouter dans le texte la partie en italique ci-dessus.

Page 139, 8e ligne, lire $[A_2]$ au lieu de [A],

TABLE DES MATIERES

SIXIÈME PARTIE

INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE DES QUANTITÉS MAGNÉTIQUES

I

Les quantités et les unités magnétiques.

Lois des actions magnétiques. . . 1
Intensité de pôle. 2
Moment magnétique. 2
Intensité d'aimantation. 3
Intensité de champ. 3
Flux de force magnétique. . . . 3
Induction magnétique. 4
Perméabilité. 4
Susceptibilité. 4
Réluctivité. 5
Circuit magnétique. 5
Réluctance. 5
Force magnétomotrice. 6
Force magnétisante. 7

II

Considérations générales sur l'examen des fers et aciers et sur les mesures magnétiques.

Importance de la question au point de vue industriel. 9
Analyses chimiques. 9
Examen physique : microstructure. . 11
Essais magnétiques des fers. . . . 14
Influence de l'hystérésis sur les essais magnétiques. 14
Joint magnétique. 15
Qualités magnétiques généralement imposées pour la fourniture des fontes, aciers coulés, fers forgés, tôles utilisés dans les constructions électriques. 17
Préparation des échantillons. . . 19
Instruments de mesures magnétiques. 20

III

Mesure de l'induction $\mathcal{B}$ en fonction de la force magnétisante $\mathcal{H}$.

MÉTHODES DE MESURE DE L'INDUCTION. 21
MÉTHODE BALISTIQUE OU DES VARIATIONS DE FLUX. 21
Mesure de la force magnétisante $\mathcal{H}$. 23
Mesure de l'induction $\mathcal{B}$. 24
Galvanomètre balistique. 25
Etalonnage du galvanomètre balistique. 26
Méthodes de mesure de l'induction $\mathcal{B}$. 29
Méthode de Rowland. 29
Méthode d'Hopkinson. 31
Méthode d'Ewing. 34
Méthode dite du joug. 41
Méthode de Picou éliminant l'influence des joints. 43
MÉTHODE D'ARRACHEMENT OU DE LA FORCE PORTANTE. 50
Perméamètre J. Carpentier. . . . 50

Balance magnétique du Bois. . . 52
Balance magnétique Fischer-Hinnen. 54
Balance Ewing. 57
Perméamètre de Lamb et Walker. . 61
Méthode fondée sur la mesure du champ magnétique. 63
Mesure du champ magnétique par la méthode d'induction. 63
Inductomètre de Miot. 64
Méthode de la spirale de bismuth de Lénard. 65
Perméamètre Bruger. 68
Perméamètre Siemens et Halske. . 70
Perméamètre à torsion J. Carpentier. 75
Perméamètre de Drysdale. . . . 80
Méthode de comparaison. 86
Pont magnétique d'Ewing 87
Pont magnétique de Frank Holden . 92

IV

Mesure de l'hystérésis.

Hystérésis. 94
Méthodes de mesure de l'hystérésis. 98
Méthodes donnant le tracé de la boucle d'hystérésis. 98
Traceur magnétique d'Ewing. . . 100
Méthodes directes. 100
Méthode du wattmètre. 100
Hystérésimètre Ewing. 102
Hystérésimètre Blondel. 110
Remarque sur l'emploi des hystérésimètres. 112

APPENDICE

Transformations allotropiques du fer et technique métallographique des aciers.

Classification commerciale des aciers et fontes d'après leur teneur en carbone. 114
Mélanges eutectiques. 116
Corps ajoutés aux mélanges fer-carbone pour modifier leurs propriétés. 117
Points critiques du fer pratiquement pur. 118
Etats allotropiques du fer pratiquement pur. 119
Points critiques des aciers. . . . 121
Absence de points critiques pour certains aciers mixtes. 123
Constituants des mélanges fer-carbone. 123
Doctrine des phases. 124
Diagramme de Roozeboom. . . . 124
Description des constituants des mélanges fer-carbone. 133
Solidification des mélanges fer carbone. 145
Autres états supposés du fer. . . 145
Diagramme de Roozeboom complété. 146
Recherche des constituants dans les mélanges fer-carbone. 147
Marche de la recherche des constituants. 153
Interprétation des observations. . 158
Application aux métaux magnétiques. 158
Conclusion. 159
Composition chimique de quelques aciers pour aimants permanents. 159

Errata. 161

PARIS. — E. DE SOYE ET FILS, IMPRIMEURS, 18, RUE DES FOSSÉS-SAINT-JACQUES.

PARIS. — L. DE SOYE ET FILS, IMPRIMEURS, 18, RUE DES FOSSÉS-SAINT-JACQUES.







